

УДК 621.914

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-10-13-21

В.М. Давыдов, А.В. Никитенко, М.Р. Гимадеев, В.О. Беркун

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ МЕЛКОРАЗМЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрены вопросы обработки глухих отверстий фрезерованием методом винтовой интерполяции концевыми цилиндрическими твердосплавными фрезами относительно малых размеров в деталях из сплава 12X18N10T. Особенности данной обработки являются наличие значительных осевых и радиальных составляющих сил резания при относительно невысокой прочности инструмента. Это приводит к тому, что ключевым фактором выхода из строя инструмента является механическая поломка, причиной которой является возрастание сил резания вследствие выкрашивания кромки фрезы. Экспериментально доказано, что наиболее рациональными параметрами обработки для обеспечения заданной точности и качества по-

верхности обрабатываемых отверстий при использовании стратегии фрезерования с винтовой интерполяцией будет являться выбор шаг спирали $p = 0,2$ мм, диапазон подач $F = 0,075-0,11$ мм/зуб, что соответствует минутным подачам центра фрезы 450-675 мм/мин. Найден оптимальный диапазон режимов резания в диапазоне подач от 450 до 675 мм/мин, при шаге спирали винтовой интерполяции 0,2 мм. Проведена оценка точности и шероховатости отверстий, полученных методом фрезерования концевыми фрезами диаметром 3 мм для стали 12X18N10T.

Ключевые слова: фрезерование, концевая цилиндрическая фреза, точность, шероховатость, износ, обработка отверстий, оптимизация.

V.M. Davidov, A.V. Nikitenko, M.R. Gimadeev, V.O. Berkun

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MILLING HOLES WITH A SMALL-SIZED TOOL IN THE CONDITIONS OF AUTOMATED PRODUCTION

The purpose of the paper. In order to solve the problems of increasing the efficiency of machining operations of small diameter holes by milling, the optimal range of cutting modes and helix pitch for the machining strategy with helical interpolation is established. The reduction of labor intensity and costs of hole machining when treating holes in alloyed corrosion-resistant steels is experimentally confirmed.

Research methods. In this paper, the issues of machining blind holes by helical interpolation milling with end cylindrical carbide cutters of relatively small dimensions in parts made of 12X18N10T alloy are considered. The features of this machining are availability of significant axial and radial components of the cutting forces with relatively low tool strength. This leads to the fact that a key factor of the tool failure is its mechanical failure, the cause of which is an increase

in cutting forces due to the edge of the cutter being chipped.

Research results and novelty. It has been experimentally proved that the most rational machining parameters to ensure the specified accuracy and surface quality of the machined holes when using a strategy of helical interpolation milling will be the choice of the helix pitch $p = 0.2$ mm, the feed range $F = 0.075-0.11$ mm/tooth, which corresponds to the minute feeds of the milling center 450-675 mm/min.

Conclusions. The optimal range of cutting modes is found in the feed range from 450 to 675 mm/min, with a helical interpolation pitch of 0.2 mm. The accuracy and roughness of the holes obtained by milling with end mills with a diameter of 3 mm for steel 12X18N10T is evaluated.

Key words: milling, end cylindrical cutters, accuracy, roughness, wear, hole machining, optimization.

Введение

В условиях роста физико-механических характеристик и эксплуатационных параметров новых конструкционных материалов, разнообразия геометрии инструментальных систем, требований к производительности современных стан-

ков с ЧПУ, а также к качеству и точности изготовления деталей актуализируется необходимость выявления оптимальных сочетаний режимов обработки, инструментальных решений и стратегий обработки различных поверхностей [1–4].

Наиболее остро проблема выбора оптимальных характеристик технологических переходов встает в процессе обработки материалов, вызывающих наибольшие проблемы с производительностью, отводом стружки и стойкостью инструмента [5], таких как высоколегированные коррозионностойкие стали аустенитного класса.

Сложность решения задачи обоснованного назначения стратегии эксплуатации режущего инструмента обусловлена ее многовариантностью, связанной с вариативностью параметров режущего инструмента [6–8] и характеристик обрабатываемого материала [9–11], неопределенностью условий эксплуатации режущего инструмента [12, 13] и спецификой конкретного машиностроительного производства [14].

В данной работе рассмотрены вопросы обработки глухих отверстий фрезерованием методом винтовой интерполяции концевыми цилиндрическими твердосплавными фрезами относительно малых размеров в деталях из сплава 12Х18Н10Т. Особенности данной обработки являются наличие значительных осевых и радиальных составляющих сил резания при от-

Методы исследования

Оптимизация процесса фрезерования отверстий базируется на минимизации целевой функции затрат

$$F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n C(\vec{x})_i \rightarrow \min.$$

Рассмотрим основные виды затрат, необходимые для обработки отверстий методом фрезерования с винтовой интерполяцией:

$$C_1 = \left(\frac{(l + l_{\text{вп}})\pi d}{p S f_z z} + \frac{t_{\text{см}}}{n} \right) \frac{C_m}{60},$$

$$C_2 = \frac{C_{\text{инс}}}{n}.$$

где C_1 – затраты на эксплуатацию оборудования и заработную плату, руб; C_2 – затраты на инструмент, руб; S – частота вращения шпинделя, мин^{-1} ; f_z – подача на зуб, мм/зуб ; z – число зубьев; d – диаметр отверстия, мм ; l – глубина отверстия, мм ; $l_{\text{вп}}$ – высота врезания, мм ; p – шаг спирали, мм ; n – количество отверстий, обрабатываемых фрезой до ее поломки; $t_{\text{см}}$ – время на смену инструмен-

носителю невысокой прочности инструмента. Это приводит к тому, что ключевым фактором выхода из строя инструмента является механическая поломка, причиной которой является возрастание сил резания вследствие выкрашивания кромки фрезы.

Стратегия с винтовой интерполяцией – это трехосевая обработка, при которой инструмент углубляется по спиральной траектории в материал заготовки. Данная стратегия применяется для чистовой обработки как уже существующих отверстий, так и получения отверстий в сплошном материале. Основным преимуществом данной стратегии по сравнению со сверлением является возможность изготовления точных отверстий различного диаметра универсальным инструментом [15], контроль над стружкообразованием и возможность управления силами резания.

Высокая точность и гибкое управление параметрами обрабатываемых отверстий требуется, в частности, для получения внутренних резьб методом резьбофрезерования. Данное преимущество особенно актуально для многономенклатурного производства.

та, мин ; C_m – стоимость нормо-часа, руб; $C_{\text{инс}}$ – стоимость инструмента, руб.

Затраты на эксплуатацию оборудования и заработную плату уменьшаются пропорционально росту производительности, связанному с повышением режимов резания, при этом затраты на инструмент растут, поскольку с повышением режимов период стойкости сокращается.

Для определения оптимума возникает необходимость прогнозирования периода стойкости либо критических значений режимов резания, при которых надежность процесса обработки остается достаточно высокой [16]. В статье приводятся результаты экспериментов по определению критических значений режимов резания для концевой цилиндрической твердосплавной фрезы фирмы *Jerry* диаметром 3 мм и числом зубьев $z = 4$ с покрытием TiAlN.

Механообработка проводилась на образцах, изготовленных из стали 12Х18Н10Т. Диаметр обрабатываемых отверстий – 4,8

мм, глубина – 8 мм. Частота вращения шпинделя 4000 мин⁻¹. Подача варьировалась от 225 мм/мин до 900 мм/мин. Для проведения экспериментальных исследований использовался вертикальный обрабатывающий центр с ЧПУ *DMG MORI DMC 635v ecoline*. Измерения параметров профиля проводились

Результаты и обсуждения

Критериями выбора оптимальных режимов выбрана стоимость обработки и надежность процесса фрезерования. В

лись при помощи профилографа-профилометра *SURFCOM 1800D* с использованием 50 % Гауссова фильтра *PC (Phase correct)*. Измерения параметров шероховатости проводились по трем трассам, а за среднюю высоту микронеровностей выбиралось максимальное значение [16].

табл. 1 указаны данные полученные после проведенного эксперимента.

Таблица 1

Зависимость стоимости обработки отверстий от параметров обработки

Шаг, мм	Подача на зуб, мм/зуб	Производительность, куб. см/мин	Время обработки, мин	Средняя стоимость, мин	Затраты на инструмент, руб.	Затраты на эксплуатацию оборудования и заработную плату, руб.	Общая стоимость одного отверстия, руб.
p	fz	Q	t	n	C_2	C_1	ΣC
0,1	0,0375	0,064	2,261	>578,8	2,34	46,02	48,36
0,2	0,0750	0,256	0,565	>144,6	1,17	11,70	12,87
0,2	0,1125	0,384	0,377	>48,2	2,34	8,32	10,66
0,3	0,1125	0,577	0,251	16,06	4,69	6,59	11,28
0,4	0,1500	0,771	0,188	<0,1	300,0	103,76	403,76
0,3	0,1500	0,769	0,188	6,58	8,57	6,63	15,2
0,4	0,1500	1,025	0,141	<0,1	300,0	102,83	402,83

Увеличение минутной подачи программируемой точки (центра фрезы) для данного диаметра спирали ограничено динамикой станка и составляет около 930 мм/мин. По мнению авторов, наиболее оптимальными технологическими параметрами являются следующие: шаг спирали p

$= 0,2$ мм, диапазон подач $F = 0,075-0,11$ мм/зуб, что соответствует минутным подачам центра фрезы 450-675 мм/мин (рис. 1). При величине шага спирали свыше 0,3 мм поломка инструмента происходит в первом отверстии, поэтому данные точки не отображены на графике.

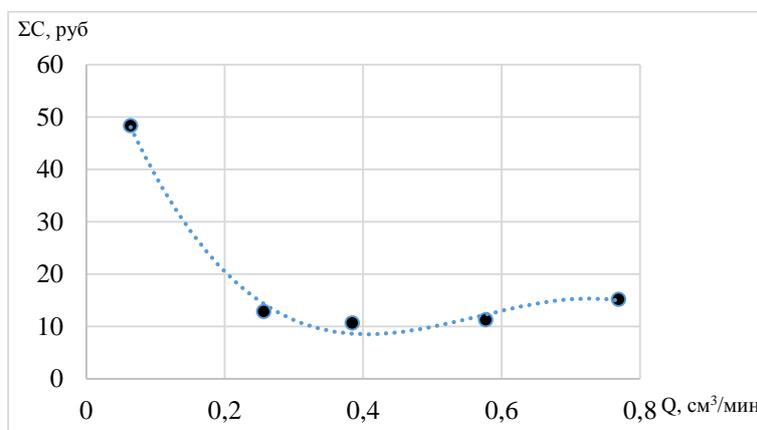


Рис. 1. Зависимость стоимости обработки одного отверстия от производительности

Для оценки точности обработки и качества поверхностей проведены измерения диаметров отверстий на различной глубине, а также шероховатости цилиндрической поверхности.

На режимах обработки, принятых за оптимальные, графики замеров диаметров на глубине 1 мм и 5 мм представлены на рис. 2.

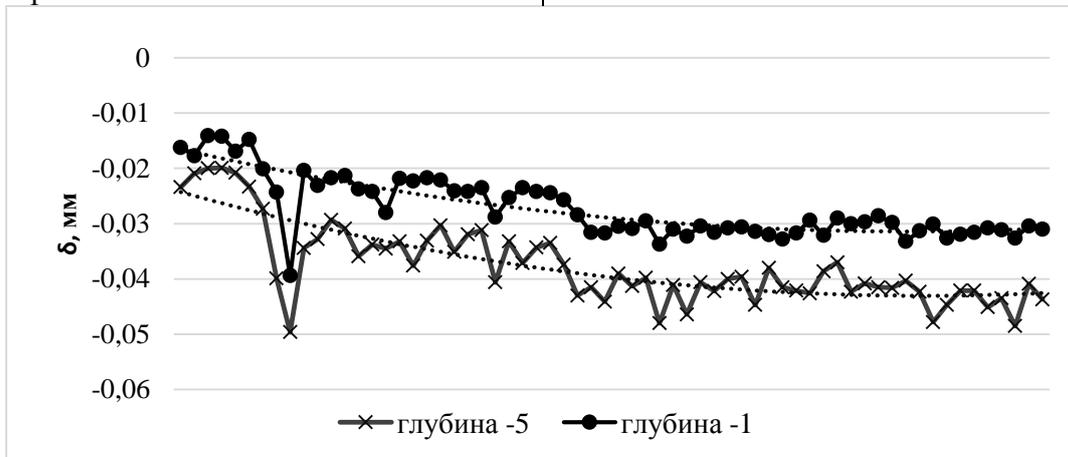


Рис. 2. Отклонение диаметрального размера от номинального значения

Отклонения размеров δ возрастают в период приработки на первых 30 отверстиях, затем наступает период нормального износа, с относительно небольшим изменением получаемого размера. Рекомендуется проводить коррекцию радиуса инструмента после обработки первых 20...30 отверстий, затем на каждые 100 отверстий. Разность диаметров по глубине, вероятно, обусловлена упругими деформациями фрезы под действием сил резания и не превышает 10 микрон в выбранном диапазоне глубин.

Величина среднеквадратичного отклонения на участке нормального износа составляет 3,05 микрона, что для черновой обработки является хорошим показателем.

На рис. 3 показаны графики изменения размеров режущих кромок инструментов от времени обработки на различных режимах. Измерения проводились с использованием контактного датчика *HEIDENHAIN TT140*.

На рекомендуемых режимах размерный износ практически не обнаруживается, на длину инструмента большую погрешность вносят температурные деформации, а колебания измеренных значений радиуса фрезы не превышает 5 мкм, что соизмеримо с точностью контактного датчика.

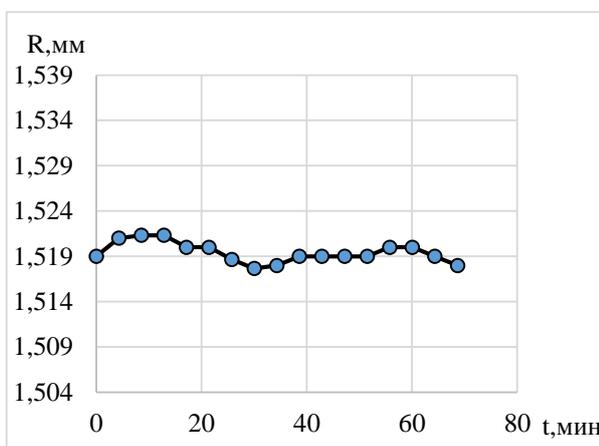
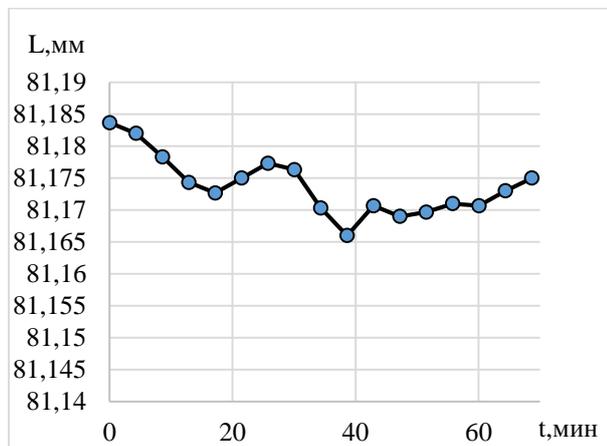
Анализируя значения при критических режимах обработки, можно сделать вывод: поломка связана с выкрашиванием, что привело к существенному изменению радиуса инструмента.

При назначении режимов резания, помимо требований к показателям точности обрабатываемых отверстий, как правило, учитывается количественная оценка одного из параметров качества — шероховатость. При этом реальная шероховатость является следствием множества факторов механообработки, например — вибрации технологической системы, связанной с упругими отжатыми. Обращает на себя внимание тот факт, что при методах сверления и фрезерования отверстий современным, высокопроизводительным инструментом, обеспечивающим точность *IT7...IT10* шероховатость поверхности практически одинакова и составляет $Ra \approx 1...2$ мкм. При этом существующие подходы к нормированию шероховатости по параметрам Ra и Rz имеют свои недостатки. В частности, для оценки эксплуатационных характеристик поверхности, указанных параметров недостаточно. Это связано с тем, что осуществляемая оценка поверхности, на основании приведенных выше параметров, не всегда позволяет однозначно определить истинную геометрическую

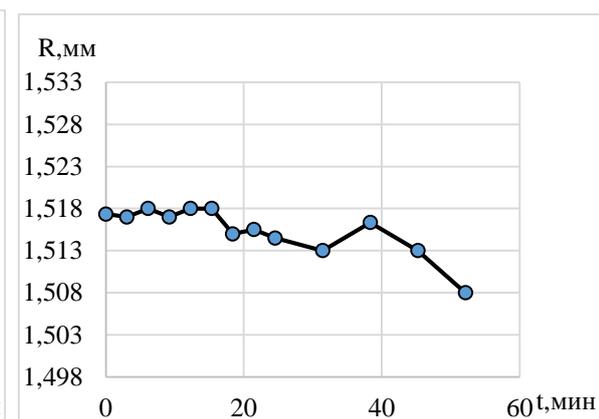
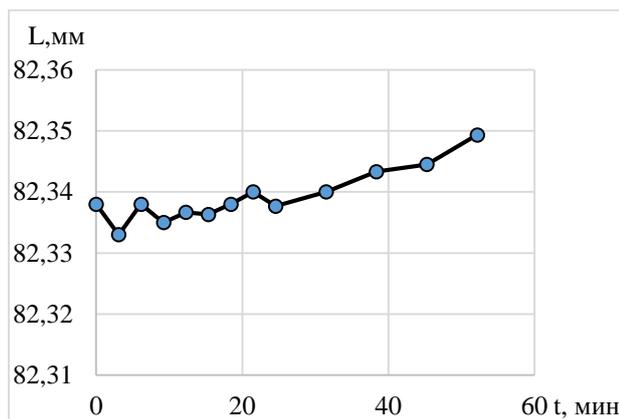
форму элемента микрорельефа. В настоящее время наиболее подробно триботехнические характеристики поверхности описываются параметрами шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [17–19], в котором регламентируются не только ам-

плитудные, шаговые, но и комбинированные параметры шероховатости.

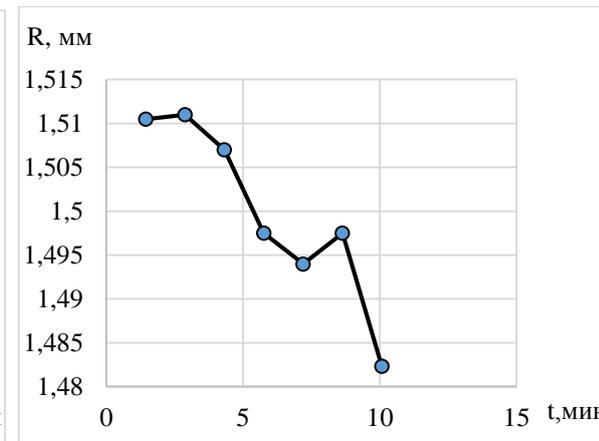
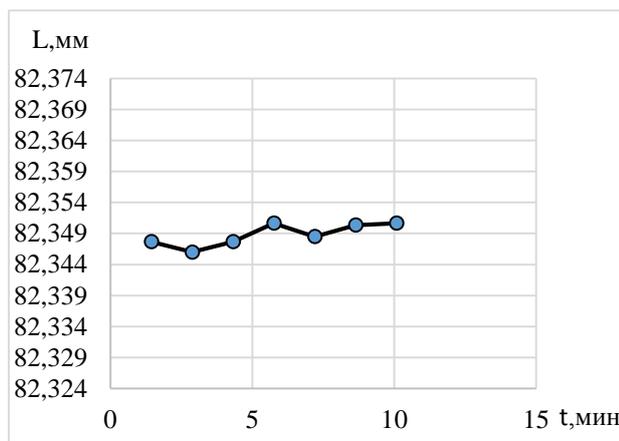
На основании полученных данных после проведенного эксперимента составлена табл. 2, в которой приведены значения коэффициентов корреляции параметров шероховатости.



а)



б)



в)

Рис. 3. Изменение длины и радиуса инструмента в зависимости от времени обработки:
 а – $F=675$ мм/мин, $p=0,2$ мм; б – $F=450$ мм/мин, $p=0,2$ мм; в – $F=900$ мм/мин, $p=0,3$ мм

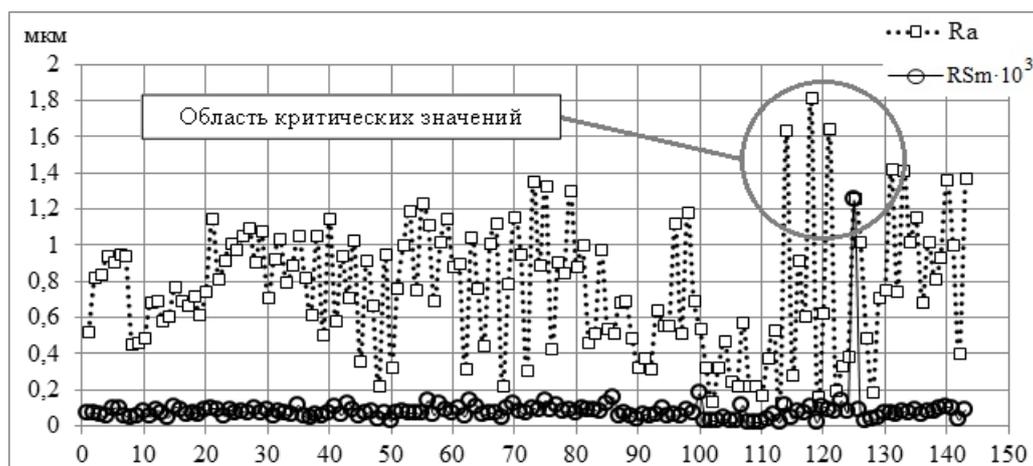
Таблица 2

Коэффициенты корреляции параметров шероховатости

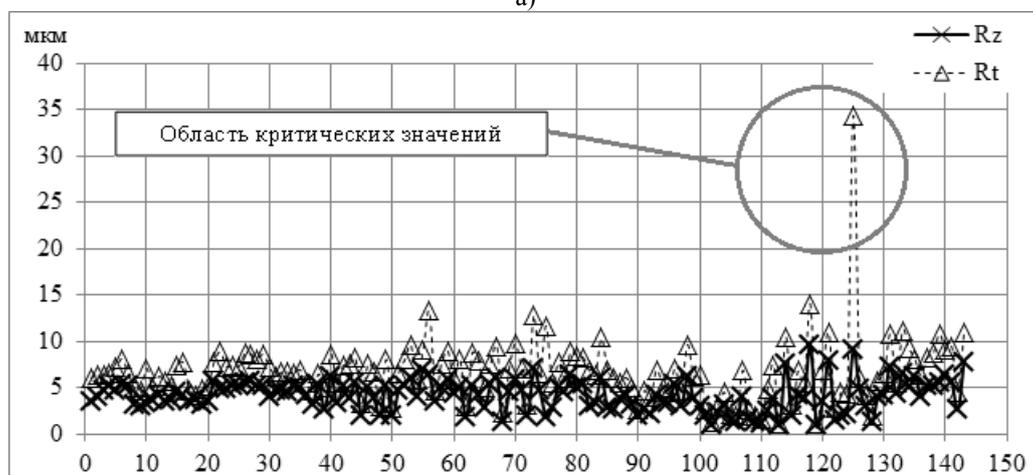
	Ra	Rq	Rz	Rt	Rp	Rv	RSm	Rsk
Ra	1,000	0,996	0,932	0,881	0,928	0,921	0,498	0,099
Rq	0,996	1,000	0,942	0,904	0,935	0,935	0,516	0,086
Rz	0,932	0,942	1,000	0,866	0,889	0,919	0,439	0,051
Rt	0,881	0,904	0,866	1,000	0,869	0,872	0,649	-0,011
Rp	0,929	0,935	0,889	0,869	1,000	0,792	0,446	0,294
Rv	0,920	0,930	0,919	0,872	0,792	1,000	0,493	-0,141
RSm	0,498	0,516	0,439	0,649	0,446	0,493	1,000	-0,206
Rsk	0,099	0,086	0,051	-0,011	0,294	-0,141	-0,206	1,000

Исходя из данных табл. 2, можно сделать вывод, что необходимо контролировать как традиционные Ra , Rz , так и параметры шероховатости Rt , RSm и Rsk . Параметр Rsk характеризуется низкими коэффициентами корреляции и является статистически не достоверным, так как значительно превосходит доверительный интер-

вал ($p > 0,05$). В связи с этим параметр шероховатости Rsk не может являться параметром оценки качества. Учитывая этот факт, рассмотрим результаты распределения данных параметров и выявим критические значения, сгруппировав параметры как показано на рис. 4а, б.



а)



б)

Рис. 4. Изменение длины и радиуса инструмента в зависимости от времени обработки для параметров шероховатости: а) Ra и $RSm \cdot 10^3$, б) Rz и Rt

Зависимость параметров шероховатости (рис. 4) имеет хоть и сложный, но однозначный характер, при этом критические значения шероховатости обоснованы

Выводы

Основным критерием износа для фрез малого диаметра является поломка, к которой приводят сколы и трещины. При задании шага спирали свыше 0,3 мм происходит поломка инструмента. Увеличение минутной подачи программируемой точки (центра фрезы) для данного диаметра спирали ограничено динамикой станка и составляет около 930 мм/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рычков Д. А.** Приведенные затраты производства при обработке композиционных материалов / Д. А. Рычков, Д. В. Лобанов // Механика XXI века. Серия: Современные технологии и автоматизация в машиностроении. – 2016. – №15. – С. 25-30.
2. **Саблин П. А.** Высота микронеровностей и параметры шероховатости - комплексная оценка качества обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № 7 (47). – С. 90-94.
3. **Roukema J. C.** Generalized modeling of drilling vibrations Part I / J. C. Roukema, Y. Altintas // Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2007. – №47. – P. 1455-1473.
4. **Roukema J. C.** Generalized modeling of drilling vibrations Part II / J. C. Roukema, Y. Altintas // Chatter stability in frequency domain, International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2007. – №47. - P. 1474-1485.
5. **Пасько Н. И.** Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н. И. Пасько, А. В. Анцев, Н. В. Анцева. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 174 с.
6. **Мартинов Г. М.** Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г. М. Мартинов, А. С. Григорьев // Станки и инструмент. – 2012. – №12. – С. 23-27.
7. **Пасько Н. И.** Верная модель износа режущего инструмента и оптимизация режима профилактики / Н. И. Пасько, А. В. Анцев, Н. В. Анцева, С. В. Сальников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №12(1). – С. 119-130.
8. **Борискин О. И.** Анализ точности профиля эвольвентных червячных фрез с твердосплавными СМП / О. И. Борискин, Н. Г. Стаханов, А. В. Якушенков, [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №3. – С. 143-146.
9. **Макаренко К. В.** Исследование стойкости многогранных неперетачиваемых пластин при токарной обработке, термически упрочненной стали 40X2H2MA / К. В. Макаренко, А. Н. Толстяков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – №6(67). – С. 11-15.
10. **Анцев А. В.** Повышение эффективности обработки резанием при формообразовании сложных поверхностей в условиях неопределенности производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №8(1). – С. 221-229.
11. **Пасько Н. И.** Комплексная модель износа режущего инструмента и пример ее применения для оптимизации режима профилактики / Н. И. Пасько, А. В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – №11(2). – С. 192-202.
12. **Аникеева О. В.** Синтез допусков параметров геометрической точности металлорежущих станков / О. В. Аникеева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 6. – С. 95-103.
13. **Аникеева О. В.** Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования / О. В. Аникеева, А. Г. Ивахненко, В. В. Куц // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2(298). – С. 159-164.
14. **Анцев А. В.** Информационная поддержка назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента/ А. В. Анцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. Т. 15. – №5. – С. 128-136.

15. **Стельмаков В. А.** Повышение эффективности чистовой обработки отверстий концевыми фрезами на обрабатывающих центрах с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Стельмаков Вадим Александрович ; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. – Комсомольск-на-Амуре, 2019. – 182 с. – Библиогр.: с. 15-16.
16. **Анцев А. В.** Назначение рациональных режимов резания с учетом вариабельности процесса резания / А. В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Серия: Технология машиностроения. – 2019. – №7. – С. 3-12.
17. **Гимадеев М. Р.** Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Технология машиностроения. – 2018. – №11. – С. 9-16.
18. **Гимадеев М. Р.** Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Тяжелое машиностроение. – 2018. – №9. – С. 24-29.
19. **Давыдов В. М.** Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В. М. Давыдов, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, А. В. Сарыгин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Том 15. – № 6 (174). – С. 243-248.
20. **Стельмаков В. А.** Обеспечение точности формы отверстий, полученных фрезерованием с винтовой интерполяцией на обрабатывающих центрах с ЧПУ / В. А. Стельмаков, В. М. Давыдов, А. В. Никитенко, М. Р. Гимадеев // Вестник машиностроения. – 2018. – № 12. – С. 73-76.
1. **Richkov, D.A., Lobanov, D.V.** Modified Production Costs while Machining Composite Materials. *Mekhaniki 21 Veku. Sovremennie tekhnologii i avtomatizatsiya v mashinostroenii*, 2016, no.15, pp. 25-30.
2. **Sablin, P.A. Shchetinin, V.S.** Micro-roughness Height and Roughness Parameters – a Comprehensive Assessment of Treated Surface Quality. *Scholarly Notes of KNASTU*, 2020, no. 7 (47), pp. 90-94.
3. **Roukema J. C., Altintas Y.** Generalized modeling of drilling vibrations Part I. Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, no.47, pp. 1455-1473.
4. **Roukema J. C., Altintas Y.** Generalized modeling of drilling vibrations Part II. Chatter stability in frequency domain, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, no. 47, pp. 1474-1485.
5. **Pasko, N.I. Antsev, A.V., Antseva, N.V.** Generalized Stochastic Model of Cutting Tool Failures and its Application. Tula, TulGU, 2016, 174 p.
6. **Martinov, G.M., Grigoryev, A.S.** Diagnostics of Cutting Tools and Prediction of Their Residual Durability at CNC machines During Machining. *Stanki i instrument*, 2012, no. 2, pp. 23-27.
7. **Pasko, N.I. Antsev, A.V., Antseva, N.V., Salnikov, S.V.** Fan Model of Cutting Tool's Wear and Optimization of Preventive Maintenance Mode. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*, 2015, no. 12(1), pp. 119-130.
8. **Boriskin, O.G., Stakhanov, N.G., Yakushenko, A.V.** Analysis of the Accuracy of Involute Profile Hobs with High-alloy SMP. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*, 2016, no. 3, pp. 143-146.
9. **Makarenko, K.V., Tolstyakov, A.N.** Investigation of Faceted Through-way Tip Durability at Thermally Hardened 40X2H2MA Steel Turning. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2018, no.6(67), pp. 11-15.
10. **Antsev, A.V.** Increase of Efficiency of Proceeding by Cutting at the Shaping of Difficult Surfaces in the Conditions of Uncertainty of Production. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*, 2016, no. 8(1), pp. 221-229.
11. **Pasko, N.I., Antsev, A.V.** Unifying Model of Cutting Tool Wear and Example of its Application for Preventive Maintenance Mode Optimization. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*, 2015, no. 11(2), pp. 192-202.
12. **Anikeeva, O.V.** Synthesis of Tolerances of Geometrical Accuracy Parameters of Metal-Cutting Machines. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 95-103.
13. **Anikeeva, O.V., Ivakhnenko, A.G., Kuts, V.V.** The Forecasting of a Parametric Reliability of a Precision Process Equipment. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2013, no. 2(298), pp. 159-164.
14. **Antsev, A.V.** Information Support to Define a Strategy for the Effective Operation of a Blade Tool. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 128-136.
15. **Stelmakov, V.A.** Improving the Efficiency of Finishing Holes with End Mills on CNC Machining Centers in Conditions of Multi-product D.Ph.thesis. Komsomolsk-na-Amure, Komsomolsk-na-AmureState University, 2019. 182p.
16. **Antsev, A.V.** Rational Cutting Modes Appointment Taking into Account the Variability of the Cutting Process. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*, 2019, no.7, pp. 3-12.
17. **Gimadeev, M.P., Davidov, V.M.** Ensuring Quality of a Surface When Mechanoprocessing Figurine Details. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2018, no. 11, pp. 9-16.
18. **Gimadeev, M.P., Davidov, V.M.** Correlations of Roughness Indicators during Milling with a Spherical Tool. *Tyazheloe Mashinostroenie*, 2018, no. 9, pp. 24-29.

19. **Davidov, V.M., Gimadeev, M.P., Nikitenko, A.V., Sarygin, A.V.** Formation of Roughness Parameters Based on Correlations during Finishing Milling of Spatially Complex Surfaces. *Uprochnyaushchie Tekhnologii I Pokrytiya*, 2019, vol. 15, no. 6 (174), pp. 243-248.

20. **Stelmakov, V.A., Davidov, V.M., Nikitenko, A.V., Gimadeev, M.P.** Ensuring the Accuracy of Holes Shape Obtained by Helical Interpolation Milling on CNC Machines. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2018, no.12, pp. 73-76.

Ссылка для цитирования:

Давыдов, В.М. Повышение эффективности процесса фрезерования отверстий мелкоразмерным инструментом в условиях автоматизированного производства / В.М. Давыдов, А.В. Никитенко, М.П. Гимадеев, В.О. Беркун // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 10. – С. 13 - 21. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-10-13-21.

Статья поступила в редакцию 30.04.21.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Петрешин Д.И.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 27.07.21.

Сведения об авторах:

Давыдов Владимир Михайлович, д.т.н., профессор кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного технического университета, e-mail: 000005@pnu.edu.ru.

Никитенко Александр Васильевич, к.т.н., доц. кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного технического университета, e-mail: 005392@pnu.edu.ru.

Davidov Vladimir Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technological Informatics and Information Systems at Pacific National University. E-mail: 000005@pnu.edu.ru.

Nikitenko Aleksandr Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Informatics and Information Systems at Pacific National University. E-mail: 005392@pnu.edu.ru.

Гимадеев Михаил Радикович, к.т.н., доц. кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного технического университета, e-mail: 009063@pnu.edu.ru.

Беркун Вера Олеговна, магистрант кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного технического университета, e-mail: vera.berkun.2017@gmail.com.

Gimadeev Mikhail Radikovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Informatics and Information Systems at Pacific National University. E-mail: 009063@pnu.edu.ru.

Berkun Vera Olegovna, Master of the Department of Technological Informatics and Information Systems at Pacific National University. E-mail: vera.berkun.2017@gmail.com.