

Научная статья

УДК 621.914

<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-549-558>

Исследование влияния зажимных патронов на устойчивость процесса фрезерования

Алексей Сергеевич Пятых^{1✉}, Петр Петрович Шапарев²^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹ pyatykhas@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>² shaparev.petr@mail.ru

Аннотация. Цель – исследовать влияние инструментального зажимного патрона на динамическую устойчивость процесса фрезерования концевой фрезой заготовки из алюминиевого деформируемого сплава В95пчТ2. Для оценки динамической устойчивости применялся анализ разложенного в ряд Фурье сигнала, записанного в процессе фрезерования с помощью инструментального узконаправленного микрофона Shure PGA81-XLR. Фрезерование выполнялось на высокопроизводительном обрабатывающем центре HSC75 linear цельной твердосплавной концевой фрезой, выполненной из твердого сплава H10F. Режимы резания рассчитывались на основании диаграммы устойчивого резания, построенной по результатам операционного модального анализа технологической системы. Измерение шероховатости поверхности выполнялось контактным профилометром Taylor Hobson Form Talysurf i200. В качестве критериев оценки эффективности процесса резания использовались производительность, определяемая скоростью съема материала, и качество обработанной поверхности, устанавливаемое параметром шероховатости. Показана связь типа инструментального зажимного патрона, используемого для закрепления концевой фрезы, со скоростью съема материала и шероховатостью обработанной поверхности. Установлено, что для инструментальной наладки на базе силового зажимного патрона области стабильного резания, рассчитанные при ширине резания 16 мм и подаче резания 0,1 мм/зуб, соответствуют максимально возможной глубине резания равной 5,6 мм. При этом для остальных рассматриваемых патронов данный показатель меньше на 20–30%. В результате концевой фрезерования наладкой на базе силового патрона с цельной твердосплавной фрезой диаметром 16 мм и тремя режущими зубьями обеспечивается динамически устойчивое резание с наибольшей скоростью съема материала (575,6 см³/мин) и минимальной шероховатостью поверхности (0,56 мкм). На основании проведенного анализа для операции концевой фрезерования на станке с числовым программным управлением рекомендован выбор инструментального зажимного патрона силового типа, обеспечивающий повышение производительности фрезерования (свыше 25% относительно рассматриваемых инструментальных наладок). При этом сохраняется качество обрабатываемой поверхности и увеличивается стойкость режущего инструмента за счет динамически стабильного резания.

Ключевые слова: зажимной патрон, силовой патрон, вибрации, динамическая устойчивость, модальный анализ, концевая фреза

Для цитирования: Пятых А. С., Шапарев П. П. Исследование влияния зажимного патрона на устойчивость процесса фрезерования // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 549–558. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-549-558>

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Investigating the impact of chucks on the stability of a milling process

Aleksey S. Pyatykh^{1✉}, Petr P. Shaparev²^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹ pyatykhas@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>² shaparev.petr@mail.ru

© Пятых А. С., Шапарев П. П., 2021

<https://vestirgtu.elpub.ru>

Abstract: The impact of a tool chuck on the dynamic stability of a milling process with an end mill was investigated using a workpiece made of aluminium wrought alloy V95pchT2. To assess the dynamic stability, we analysed a Fourier-transformed signal recorded during milling using a Shure PGA81-XLR tool directional microphone. The milling was performed on an HSC75 linear high-production machining centre with an H10F solid carbide end mill. Cutting conditions were calculated based on a stability diagram derived from an operational modal analysis of a manufacturing system. The surface roughness was measured with a Taylor Hobson Form Talysurf i200 contact profilometer. Performance defined by the rate of material removal and the roughness of a treated surface was used to evaluate the cutting process. A correlation was found between the type of tool chuck fixating the end mill, the rate of material removal and the roughness of the machined surface. It was found that, for milling using a power chuck, the areas of stable cutting correspond to the maximum cutting depth equal to 5.6 mm at a cutting width of 16 mm and a cutting feed of 0.1 mm/rev. However, for the other studied chucks, this indicator was 20 to 30% lower. End milling conducted using a power chuck with a solid carbide cutter with a diameter of 16 mm and three cutting teeth resulted in dynamically stable cutting with the highest material removal rate (575.6 cm³/min) and minimum surface roughness (0.56 µm). Based on the conducted analysis, for the operation of end milling on a machine with computerised numerical control (CNC), a power tool chuck is recommended that improves milling performance by over 25% relative to the considered tool setups. Furthermore, this preserves the quality of a treated surface and increases the tool cutting life owing to dynamically stable cutting.

Keywords: clamping chuck, power chuck, vibrations, dynamic stability, modal analysis, end mill

For citation: Pyatykh A. S., Shaparev P. P. Investigating the impact of chucks on the stability of a milling process. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):549-558. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-549-558>.

ВВЕДЕНИЕ

Современная машиностроительная промышленность направлена на достижение максимальной производительности и снижение экономических затрат. Применяемые на производстве обрабатывающие центры оснащаются прогрессивным режущим инструментом, тем не менее, должного эффекта на производстве не удается достичь в полной мере. Основным сдерживающим фактором повышения производительности по-прежнему являются вибрации. Вибрации ограничивают режимы резания при обработке (особенно скорость и глубину резания), приводят к дефектам поверхности детали, повышенному наклепу поверхностных слоев, снижению точности обработки, стойкости режущего инструмента, рассогласованию соединений станка и ускоренному износу механизмов. Имеющиеся в открытой печати исследования посвящены вопросам моделирования динамики технологической системы, разработке способов гашения вибраций при механической обработке. Часто результаты исследований имеют должный эффект только в идеальных лабораторных условиях и невозможны к применению в условиях производства.

ВИБРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Вибрации представляют собой колебательные движения инструмента, заготовки

или механизмов станка, характеризующиеся такими параметрами как частота, амплитуда, скорость и ускорение. Признаком вибраций являются линии (строчка, дробление) или риски на обработанной поверхности, располагающиеся с равным интервалом, величина которых зависит от периодичности их возникновения (рис. 1).

Исследование причин возникновения вибраций и способов их подавления отражено в трудах таких авторов как Е. Будак, Ю. Алтинтас, К. Янг, М. Сидпура, Р. Пауробалли [1–9]. В работе [10] авторы разделили методы борьбы с вибрациями на две категории: технологические и конструктивные. К технологическим методам относится изменение режимов резания и углов заточки режущих инструментов. Для конструктивных методов характерно повышение жесткости всех элементов технологической системы и рассеивание энергии колебаний системы за счет использования различных виброгасителей. При этом эффективное изменение режимов резания возможно только в результате проведения большого количества исследований, позволяющих определить оптимальные условия резания для каждого материала, режущего инструмента, станка. А оснащение современного производства режущим инструментом со сменными пластинами ограничивает возможность переточки углов.

В работе [11] автор описывает исследование автоколебаний на примере концевой

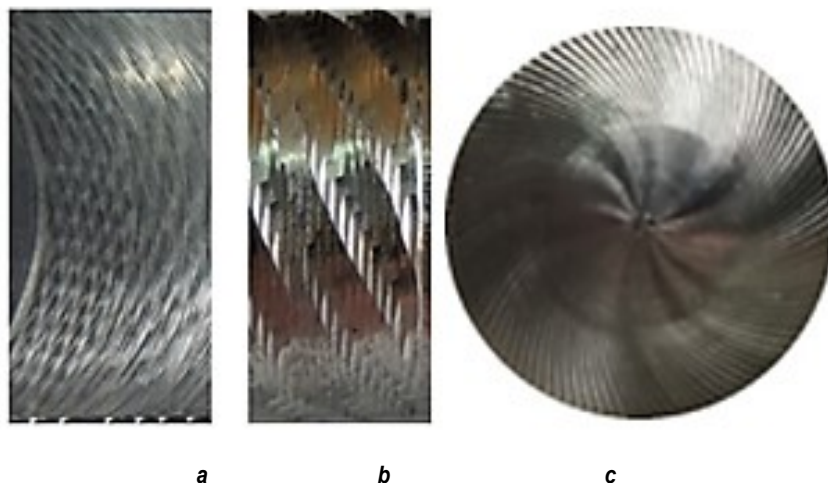


Рис. 1. Следы возникновения вибраций: а – при фрезеровании; б – при точении; с – при сверлении
Fig. 1. Vibration traces when: a – milling; b – turning; c – drilling

фрезерования и делает вывод о том, что автоколебания напрямую зависят от подачи и скорости резания. Для того чтобы не допустить проявления автоколебаний в процессе обработки, автор предлагает использовать модуляцию скорости резания. В качестве примера эффективного использования данного метода в статье описан процесс обработки с высокой подачей инструмента с модуляцией скорости резания, что позволило стабилизировать процесс и загасить автоколебания.

Несмотря на то, что данный метод дал положительные результаты, его сложность заключается в том, что модуляцию скорости резания необходимо находить опытным путем – для каждого материала и вида обработки она будет различна, что накладывает некоторые ограничения на применение данного метода на производстве.

В настоящий момент современные станки с числовым программным управлением позволяют прямо на пульте управления не только писать управляющие для обработки деталей, но и программировать модуляцию скорости резания в процессе обработки, и, как следствие, гасить регенеративные колебания [12]. При этом модуляция скорости резания программно реализована только на токарных операциях.

Одним из эффективных способов подавления регенеративных колебаний является способ SSV (от англ. Spindle Speed Variation)

– периодическое изменение частоты вращения шпинделя во времени [13–15]. В рамках исследований данный способ показал положительный результат по уменьшению проявления автоколебаний в процессе резания. Особенностью данного способа является то, что его можно запрограммировать на стойке станка. Однако он остается наиболее сложным, требующим определенных навыков и знаний оператора, и пока что не может в полной мере быть применен на производстве.

Периодическое изменение частоты вращения шпинделя может быть реализовано по синусоидальному закону SSSV (от англ. Sinusoidal Spindle Speed Variation) или же в определенном диапазоне частот случайным образом MRSSV (от англ. Multi-level Random Spindle Speed Variation). Результаты исследований показывают, что гашение вибраций способом SSSV эффективнее, чем способом MRSSV. Однако в случае высокоскоростной обработки способы SSV требуют большой амплитуды и частоты, которые могут быть ограничены системой привода шпинделя [16].

В процессе фрезерования тонкостенных деталей возникают вибрации, которые препятствуют получению требуемой шероховатости поверхности. В таких случаях эффективно применяются пассивные демпфирующие устройства с регулируемой жесткостью [17]. Многочисленные эксперименты показывают, что режущая система более устойчи-

вая при использовании пассивного демпфера.

Свою эффективность в гашении колебаний доказали способы, основанные на математическом анализе модальных параметров режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. В результате строится диаграмма устойчивости, а также определяются режимы резания, при которых наблюдается стабильное резание. Эффективность данного способа подтверждена многочисленными исследованиями российских и зарубежных авторов [18–21]. Однако даже если правильно подобраны режимы резания, есть вероятность проявления колебаний в процессе обработки, причина которых связана с демпфирующими свойствами технологической системы.

Отметим следующее: несмотря на то, что упомянутые выше исследования были посвящены разработке эффективных методов подавления вибраций, оптимизации конструкции режущего инструмента, они не учитывали влияния способа закрепления режущего инструмента в шпинделе станка на возникновение вибраций. Чаще всего в исследованиях закрепление принимается идеаль-

но жестким, и все внимание концентрируется на режущей части инструмента. Как показывают результаты данного исследования, такой подход является неполным. Подбор оптимального патрона для закрепления режущего инструмента позволит снизить вероятность возникновения вибраций без проведения сложных математических расчетов в условиях реального производства.

ПЛАНИРОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование выполнялось на фрезерном обрабатывающем центре HSC75V linear. Заготовка представляла собой блок из алюминиевого деформируемого сплава В95пчТ2. Резание выполнялось концевой фрезой (табл. 1). Закрепление инструмента осуществлялось в патронах Haimer A63.140.16 (термопатрон), CoroChuck 930-HA06-HD20-104 (гидропластовый патрон), Showa HSKA63-HPC16S-110 AA (силовой патрон) и Shunk 204055 (гидропластовый патрон) (рис. 2). Перед началом работы все инструментальные наладки были отбалансированы.



Рис. 2. Зажимные патроны: а – Shunk 204055; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; в – CoroChuck 930-HA06-HD20-104; д – Haimer A63.140.16

Fig. 2. Clamping chucks: а – Shunk 204055; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; в – CoroChuck 930-HA06-HD20-104; д – Haimer A63.140.16

Таблица 1. Геометрические параметры фрезы
Table 1. Geometrical parameters of the cutter

Параметр	Ед. измерения	Величина
Диаметр, d	мм	16
Число зубьев, z	шт.	3
Передний угол в торцевом сечении, γ_T	град.	13,5
Передний угол в радиальном сечении, γ_r	град.	10,5
Задний угол в торцевом сечении, α_T	град.	12
Задний угол в радиальном сечении, α_r	град.	8
Угол наклона винтовой канавки, α	град.	40
Материал сплава	–	H10F

Для каждой инструментальной наладки были определены модальные параметры и построены диаграммы устойчивости с начальными условиями: $a_e = 16$ мм, $f_z = 0,1$ мм/зуб (рис. 3).

На основании диаграммы устойчивого резания и рекомендаций производителя инструмента были определены режимы резания (табл. 2).

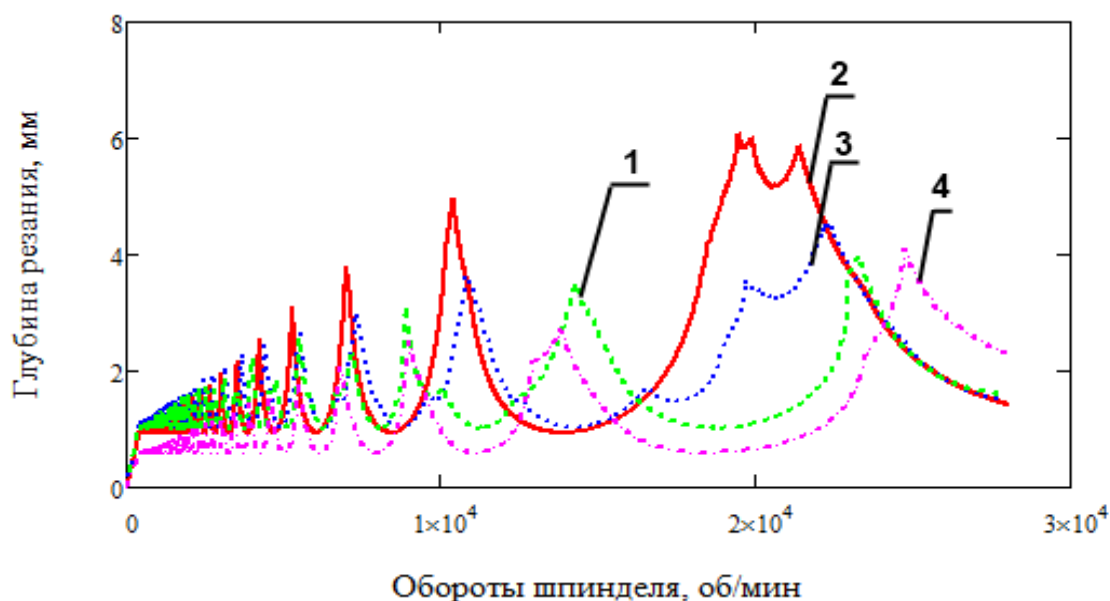


Рис. 3. Диаграмма устойчивого резания: 1 – Shunk 204055; 2 – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; 3 – CoroChuck 930-NA06-HD20-104; 4 – Haimer A63.140.16

Fig. 3. Diagram of stable cutting: 1 – Shunk 204055; 2 – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; 3 – CoroChuck 930-NA06-HD20-104; 4 – Haimer A63.140.16

Таблица 2. Режимы резания
Table 2. Cutting modes

Зажимной патрон	Обозначение патрона	f_z , мм/зуб	a_e , мм	a_p^* , мм	n^{**} , мин ⁻¹
Гидропластовый (Shunk 204055)	1	0,1	16	3	23297
Силовой (Showa HSKA63-HPC16S-110)	2			3,8	23297
Гидропластовый (CoroChuck 930-NA06-HD20-104)	3			3	21412
Термозажимной (Haimer A63.140.16)	4			5,6	21412
				3	22326
				4,4	22326
				3	24789
				4	24789

* a_p – глубина резания;

** n – вращение шпинделя.

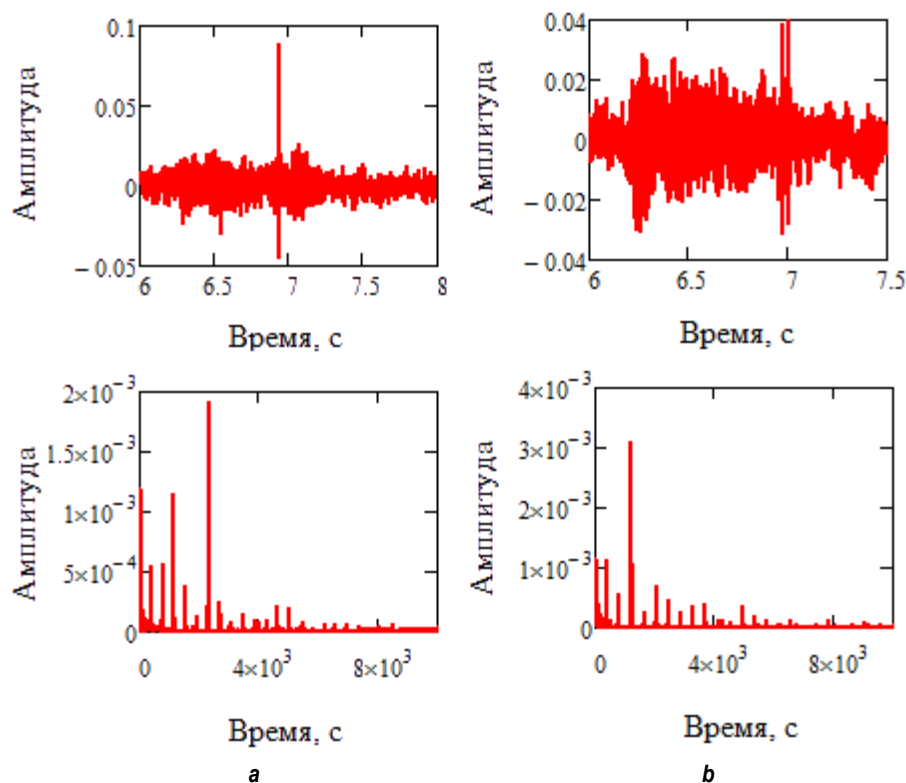


Рис. 4. Результаты измерения вибраций при фрезеровании инструментальными наладками на базе зажимного патрона: а – Shunk 204055; б – Haimer A63.140.16
 Fig. 4. Results of measuring vibrations when milling with tooling setups based on a clamping chuck: а – Shunk 204055; б – Haimer A63.140.16

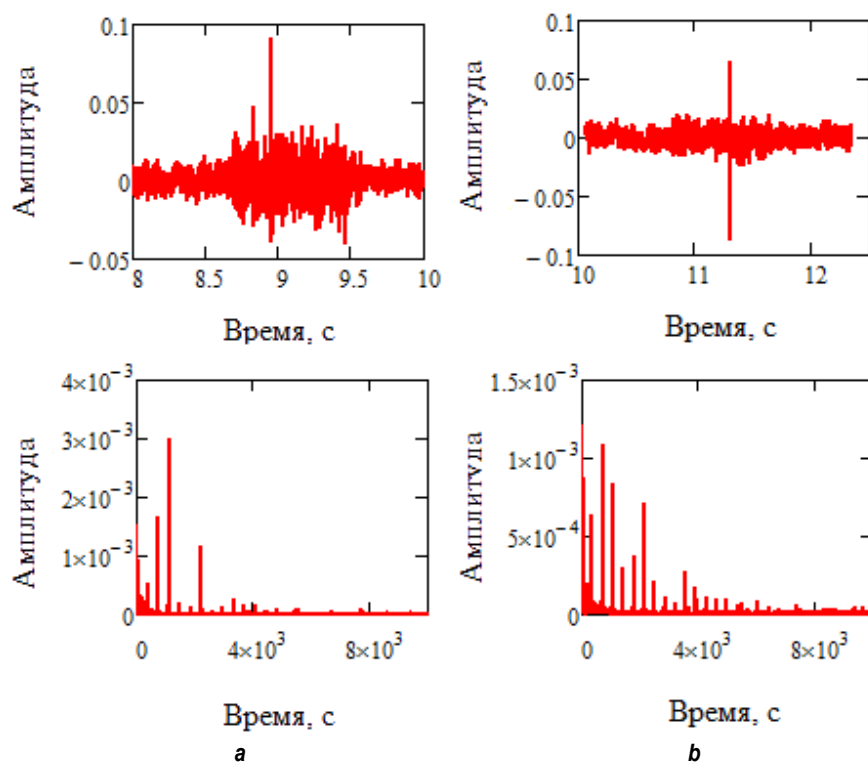


Рис. 5. Результаты измерения вибраций при фрезеровании инструментальными наладками на базе зажимного патрона: а – CoroChuck 930-NA06-HD20-104; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA
 Fig. 5. Results of measuring vibrations when milling with tooling setups based on a clamping chuck: а – CoroChuck 930-NA06-HD20-104; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния зажимного патрона на процесс резания обработка выполнялась в два этапа. Первый – с глубиной резания a_p равной 3 мм, являющейся допустимой для каждой рассматриваемой инструментальной наладки. Второй – с максимально допустимой глубиной, в соответствии с диаграммой устойчивости. В процессе обработки выполнялся контроль вибраций с помощью микрофона Shure PGA81-XLR. Временной и частотный сигналы приведены на рис. 4, 5.

Представленные на рис. 4, 5 графики позволяют говорить об отсутствии вибраций при фрезеровании независимо от типа зажимного патрона при условии назначения режимов резания на основании диаграммы устойчивого резания.

После фрезерования была измерена шероховатость обработанной поверхности (табл. 3) и построены графики зависимости

параметра шероховатости R_a от типа используемого патрона (рис. 6). Также был произведен расчет производительности операции фрезерования, определяемый скоростью съема материала – Q (см. табл. 3).

По результатам измерения шероховатости можно сделать вывод, что на качество обработанной поверхности зажимной патрон оказывает значительное влияние. Величина параметра шероховатости R_a обработанной поверхности на 60–70% меньше при фрезеровании инструментальной наладкой на базе силового патрона, чем при фрезеровании инструментальной наладкой на базе гидропластового или термозажимного патрона.

Что касается производительности операции фрезерования, то при работе инструментальной наладкой на базе силового патрона она выше в 1,27–1,47 раза, чем для остальных рассматриваемых в данной работе наладок (рис. 7).

Таблица 3. Результаты измерения шероховатости

Table 3. Roughness measurement results

Зажимной патрон	Обозначение патрона	f_z , мм/зуб	a_e , мм	a_p , мм	n , мин ⁻¹	R_a , мкм	Q , см ³ /мин
Гидропластовый (Shunk 204055)	1	0,1	16	3	23297	0,92	335,5
Силовой (Showa HSKA63-НРС16S-110)	2			3,8	23297	0,98	424,9
				3	21412	0,56	308,3
Гидропластовый (CoroChuck 930-NA06-HD20-104)	3			5,6	21412	1,42	575,6
				3	22326	1,64	321,5
Термозажимной (Haimer A63.140.16)	4			4,4	22326	0,97	471,5
				3	24789	0,98	357,0
		4	24789	1,79	475,9		

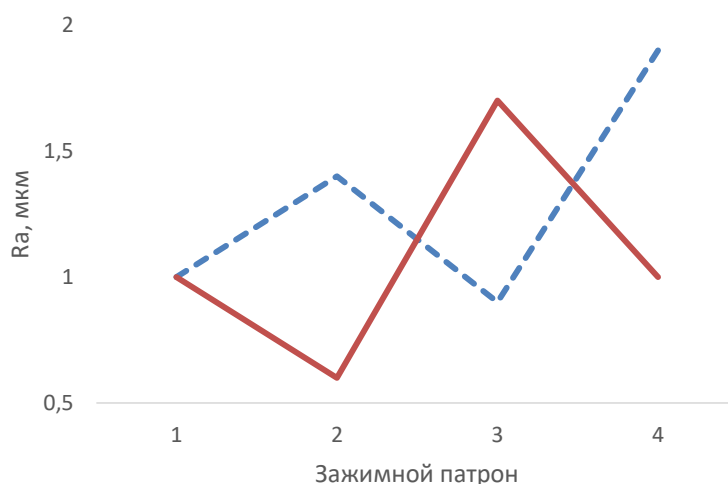


Рис. 6. График зависимости параметра шероховатости R_a
Fig. 6. Dependence diagram of the roughness parameter R_a

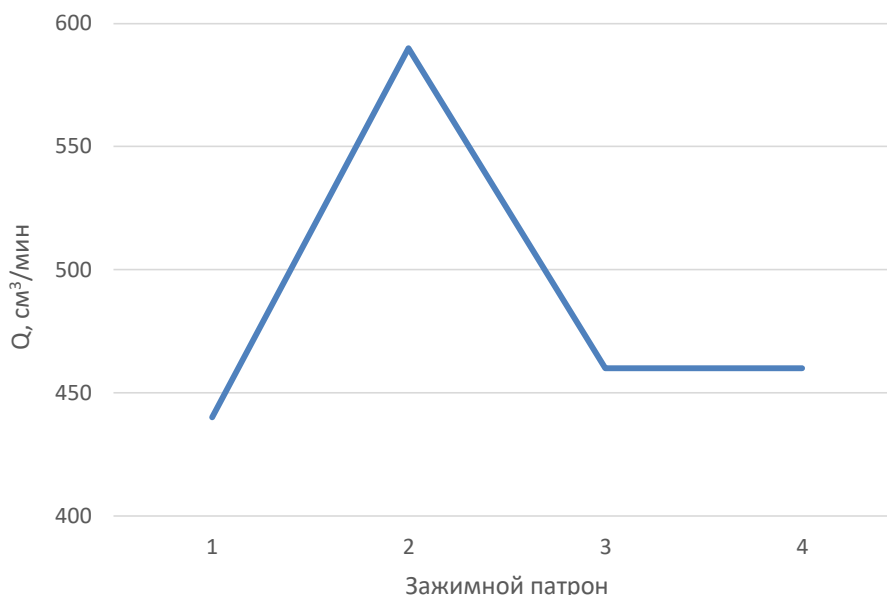


Рис. 7. График зависимости скорости съема материала Q
Fig. 7. Dependence diagram of the material removal rate Q

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о влиянии зажимных патронов на устойчивость процесса фрезерования и качество обработанной поверхности. Наибольшая скорость съема материала и минимальная шероховатость поверхности достигаются при фрезеровании инструментальной наладки на базе силового патрона.

Диаграмма динамической устойчивости, построенная на основании результатов экспериментального модального анализа, позволяет учесть модальные параметры инструментальной наладки, в том числе и зажимного патрона. Результаты исследования могут быть использованы при выборе инструментальной оснастки для станков с числовым программным управлением.

Список источников

1. Абдурахманов А. У., Джемилов Э. Ш. Анализ причин возникновения автоколебаний при механической обработке резанием // Таврический научный обозреватель. 2016. № 5-1. С. 252–257.
2. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning // Manufacture. 2012. Vol. 61. P. 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>.
3. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes: a review // Elsevier International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. Iss. 5. P. 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
4. Altintas Yu. Manufacturing automation metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design: 2nd edition. Vancouver: Cambridge University Press, 2012. 381 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>.
5. Copenhaver R., Schmitz T. Modeling and simulation of modulated tool path (MTP) turning stability // Manufacturing Letters. 2020. Vol. 24. P. 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.03.013>.
6. Yang Kai, Wang Guofeng, Dong Yi, Zhang Quanbiao, Sang Lingling. Early chatter identification based on an optimized variational mode decomposition // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 115. P. 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.052>.
7. Budak E., Tunç L. T., Alan S., Özgüven H. N. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling // CIRP Annals. 2012. Vol. 61. Iss. 1. P. 339–342. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.144>.
8. Lu Kaibo, Gu Fengshou, Longstaff A., Li Guoyan. An investigation into tool dynamics adaptation for chatter stability enhancement in the turning of flexible workpieces // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume. 2020. Vol. 111. No. 11-12. P. 3259–3271. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06339-x>.
9. Соколов Г. В., Гузев Д. А., Жидяев А. Н. Усовершенствованный полnodискретный метод анализа виброустойчивости процесса обработки концевыми фрезами с переходным радиусом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 3. С. 34–40.
10. Свинин В. М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения реге-неративных автоколебаний // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2006. № 41. С. 135–142.
11. Свинин В. М. Исследование условий возбуждения

и гашения регенеративных автоколебаний в процессе резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2005. № 1. С. 29–31.

12. Лановой Д. А., Свинин В. М., Савилов А. В. Подавление автоколебаний при концевом фрезеровании на станке с ЧПУ методом программной модуляции скорости резания // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. № IV-I. С. 79–90.

13. Внуков Ю. Н., Натальчишин В. В., Гермашев А. И., Кучугуров М. В., Дядя С. И. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. 2014. № 3(72). С. 12–17. <https://doi.org/10.20535/23059001.2014.72.32912>.

14. Liu Changfu, Zhu Lida, Ni Chenbing. The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 91. No. 3-11. P. 3339–3348. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0024-8>.

15. Bediaga I., Egaña I., Munoa J., Zatarain M., López De Lacalle L.N. Chatter avoidance method for milling process based on sinusoidal spindle speed variation method: simulation and experimental results // 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations (Reggio Calabria, August 2007). Reggio Calabria, 2007.

16. Bediaga I., Hernandez J., Munoa J., Uribe-Etxeberria R. Comparative analysis of spindle speed variation tech-

niques in milling // Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Reconstruction and Development: 15th International DAAAM Symposium (Vienna, November 2004). Vienna, 2004. P. 1–2.

17. Yuan Heng, Wan Min, Yang Yun, Zhang Wei-Hong. A tunable passive damper for suppressing chatters in thin-wall milling by considering the varying modal parameters of the workpiece // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 104. P. 4605–4616. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04316-7>.

18. Altıntaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. 1995. Vol. 44. Iss. 1. P. 357–362. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62342-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62342-7).

19. Yan Rong, Gong Yanhong, Peng Fangyu, Tang Xiaowei, Li Hua, Li Bin. Three degrees of freedom stability analysis in the milling with bull-nosed end mills // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 86. P. 71–85. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8144-5>.

20. Воронов С. А., Непочатов А. В., Киселев И. А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 1. С. 50–62. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-1-50-62>.

21. Свинин В. М., Савилов А. В., Шутенков А. В., Панин М. А. Подавление автоколебаний при токарной обработке программной модуляцией скорости резания системы числового программного управления станка // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 115–124. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-115-124>.

References

1. Abdurahmanov A. U., Dzhemilov E. Sh. Analysis of the causes of self-oscillations occurrence under by cutting. *Tavrisheskij nauchnyj obozrevatel*. 2016;5-1:252–257. (In Russ.).

2. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning. *Manu-facture*. 2012;61:27–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.0073>.

3. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes: a review. *Elsevier International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(5):363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.

4. Altintas Yu. *Manufacturing automation metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Vancouver: Cambridge University Press; 2012, 381 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>

5. Copenhaver R., Schmitz T. Modeling and simulation of modulated tool path (MTP) turning stability. *Manufacturing Letters*. 2020;24:67–71. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.03.013>.

6. Yang Kai, Wang Guofeng, Dong Yi, Zhang Quanbiao, Sang Lingling. Early chatter identification based on an optimized variational mode decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019;115:238–254. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.052>

7. Budak E., Tunç L. T., Alan S., Özgüven H. N. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling. *CIRP Annals*. 2012;61(1):339–342. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.144>

8. Lu Kaibo, Gu Fengshou, Longstaff A, Li Guoyan. An investigation into tool dynamics adaptation for chatter stability enhancement in the turning of flexible workpieces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume. 2020;111(11-12):3259–3271. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06339-x>.

9. Sokolov G. V., Guzev D. A., Zhidyaev A. N. Modified full-discretization method of bull-nosed end milling process stability analysis. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(3):34–40. (In Russ.).

10. Svinin V. M. Selection of cutting speed modulation parameters for damping of regenerative self-oscillations. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2006;41:135–142. (In Russ.).

11. Svinin V. M. Research of the regenerative self-oscillation excitation and damping conditions in the process of cutting. *Obrabotka Metallov = Metal Working and Material Science*. 2005;1:29–31. (In Russ.).

12. Lanovoy D. A., Svinin V. M., Savilov A. V. Self-oscillation suppression by the cutting speed variation method when end milling on the CNC machine tool. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure*

State Technical University. Series: Mechanical engineering. 2018; № IV-I:79-90. (In Russ.).

13. Vnukov Y., Natal'chishin V., Germashev A., Kuchugurov M., Djadja S. Suppression of self-excited vibration at milling of thin-walled details by modulation of speed of the main motion of the milling machine. *Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivs'kij politekhnichnij institut". Seriya: Mashinobuduvannya = Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2014;3(72):12-17. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2014.72.32912>.

14. Liu Changfu, Zhu Lida, Ni Chenbing. The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;91(3-11):3339-3348. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0024-8>.

15. Bediaga I., Egaña I., Munoa J., Zatarain M., López De Lacalle L. N. Chatter avoidance method for milling process based on sinusoidal spindle speed variation method: simulation and experimental results. In: *10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. August 2007, Reggio Calabria. Reggio Calabria; 2007.

16. Bediaga I., Hernandez J., Munoa J., Uribe-Etxeberria R. Comparative analysis of spindle speed variation techniques in milling. In: *Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Reconstruction and Development: 15th International DAAAM Symposium*. November 2004, Vienna.

na. Vienna; 2004, p. 1-2.

17. Yuan Heng, Wan Min, Yang Yun, Zhang Wei-Hong. A tunable passive damper for suppressing chatters in thin-wall milling by considering the varying modal parameters of the workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;104:4605-4616. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04316-7>.

18. Altıntaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*. 1995;44(1):357-362. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62342-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62342-7).

19. Yan Rong, Gong Yanhong, Peng Fangyu, Tang Xiaowei, Li Hua, Li Bin. Three degrees of freedom stability analysis in the milling with bull-nosed end mills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;86:71-85. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8144-5>.

20. Voronov S. A., Nepochatov A. V., Kiselev I. A. Assessment criteria of non-rigid part milling stability. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;1:50-62. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-1-50-62>.

21. Svinin V. M., Savilov A. V., Shutenkov A. V., Panin M. A. Damping of self-oscillations at lathe turning by software modulation of CNC machine-tool cutting speed. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):115-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-115-124>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пятых Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Шапарев Петр Петрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.07.2021; одобрена после рецензирования 28.09.2021; принята к публикации 22.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey S. Pyatykh,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Mechanical Engineering Production
Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Petr P. Shaparev,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.07.2021; approved after reviewing 28.09.2021; accepted for publication 22.10.2021.