

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №5 (131). С. 3-10.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №5 (131). P. 3-10.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-3-10

Влияние разности шагов зубьев торцевой фрезы на динамическую устойчивость нежесткой технологической системы

Сергей Владимирович Четвериков, к.т.н.

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита, Россия

Serga652008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены экспериментальные исследования влияния разности шагов смежных зубьев на возбуждение автоколебаний во фрезерной технологической системе, имеющую пониженную жесткость в направлении нормали к обработанной поверхности. Показана возможность эффективно подавлять автоколебания при торцевом фрезеровании, регулируя шаг зубьев фрезы. Установлено, что ступенчатая разношаговость зубьев позволяет подавлять автоколебания на 50 %.

Ключевые слова: торцовая фреза, динамическая устойчивость, режимы резания, технологический процесс, вибрации, механическая обработка, динамометр, регулируемый шаг зубьев

Для цитирования: Четвериков С.В. Влияние разности шагов зубьев торцевой фрезы на динамическую устойчивость нежесткой технологической системы // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №5 (131). – С. 3-10. doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-3-10.

Original article

The effect of teeth pitch diversity of face milling cutter on the dynamic stability of a non-rigid manufacturing system

Sergey V. Chetverikov, Can. Sc. Tech.

Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, Russia

Serga652008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract. Experimental studies of the effect of adjacent teeth pitch diversity on self-oscillation excitations in a cutting manufacturing system having a reduced rigidity in normal line towards treated surface, are presented. The possibility for effective suppression of self-oscillations during face milling by controlling teeth pitch of the cutter is given. A stepwise teeth diversity making possible to suppress self-oscillations by 50 % has been found.

Keywords: face milling cutter, dynamic stability, cutting modes, technological process, vibrations, machining, dynamometer, controlled tooth pitch

For citation: Chetverikov S.V. The effect of teeth pitch diversity of face milling cutter on the dynamic stability on a non-rigid manufacturing system. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.5 (131), pp. 3-10. doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-3-10.

Введение

Торцовое фрезерование является одним из широко распространенных видов механической обработки в машиностроении [1 – 5]. Однако повышение производительности сдерживается возникновением автоколебаний

на интенсивных режимах резания. При торцевом фрезеровании проявляется два вида вибраций: вынужденные колебания и автоколебания [6, 7].

Уменьшение вынужденных колебаний обеспечивается путем повышения равномерности фрезерования, снижением дисбаланса

вращающихся частей станка [8, 9].

Гораздо более сложную задачу представляет подавление автоколебаний, возникновение которых определяется физикой процесса и свойствами технологической системы [10, 11].

Применяемое оборудование, приборы и инструмент

Для проведения исследований вибраций технологической системы при торцовом фрезеровании применялось следующее оборудование: горизонтально-фрезерный станок мод. 6М82; торцовая фреза с регулируемым шагом; приспособление, имитирующее нежесткую технологическую систему; заготовка из стали 10 ГОСТ 1050-88; модуль сбора и обработки данных ZET LAB 220; персональный компьютер; эталонный динамометр; токовихревой датчик; индикаторная магнитная стойка; индикаторная головка с ценой деления 0,005 мкм; набор гаечных ключей; отвертка и молоток.

Заготовка 2 (рис. 1) крепится к приспособлению 3 шестью болтами М10. Приспособление крепится на столе фрезерного станка. В отверстие шпинделя устанавливается оправка с фрезой 1. В приспособление вкручивается токовихревой датчик 4 таким образом, чтобы зазор между датчиком и приспособлением составил 1,6 мм. Зазор выставляется с помощью щупа. Датчик подключается к модулю ZET LAB 220, который соединен с персональным компьютером, для вывода данных на экран монитора и их обработки.

Экспериментальная торцовая фреза с регулируемым шагом изображена на рис. 2. Резцы 2 имеют овальные отверстия, в которые устанавливается два болта 3, на болты 3 устанавливаются шайбы 5 и навинчиваются гайки 4. Затем резцы в сборе устанавливаются в Т-образные пазы корпуса 1 болтами 3. Болты поворачиваются на угол 90° и жестко фиксируются гайками 4. Для предотвращения проворота болта во время затяжки, в нем выполнен паз, чтобы фиксировать болт отверткой.

Предварительные опыты при фрезеровании стандартной фрезой диаметром 125 мм, числом зубьев 8, на горизонтально-фрезерном станке мод. 6М82 показали, что возбуждение автоколебаний в технологической системе (ТС) происходит при работе с большими глубинами резания [12]. С целью доказательства принципиальной возможности гашения автоколебаний было принято решение исследовать

процесс обработки нежестких заготовок, где возникновение автоколебаний происходит при небольших глубинах резания [13]. Для имитации нежесткой заготовки создано П-образное приспособление.



Рис. 1. Настройка оборудования перед началом опытов

Приспособление представляет собой опорную плиту с боковыми неподвижными пластинами, усиленными ребрами жесткости, несущие на себе две пластины, одна из которых толщиной 16 мм, вторая толщиной 3 мм. Между этими двумя пластинами расположены подкладки, для регулирования жесткости системы, закрепляемые двумя прижимами. Заготовка крепится шестью болтами к базовой пластине. Затем приспособление устанавливается на стол станка и крепится с помощью Т-образных пазов. При этом приспособление свободно перемещается в направлении поперечной подачи станка.

Модуль обработки и сбора данных ZET LAB 220 (рис. 3) – это аналого-цифровой преобразователь с 24-разрядными аналого-цифровыми преобразователями предназначенный для измерений параметров сигналов с высокой точностью и большим динамическим диапазоном, поступающих с различных первичных преобразователей: термосопротивлений, термопар, датчиков с универсальным токовым выходом 4...20 мА.

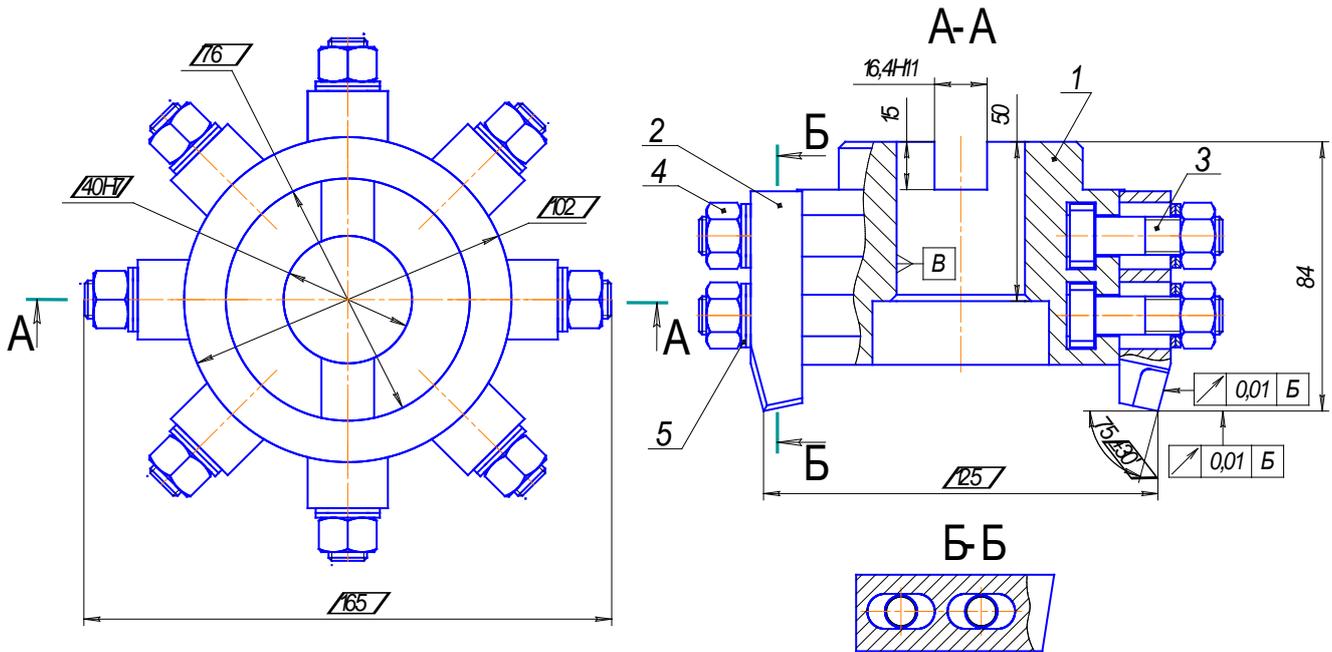


Рис. 2. Экспериментальная торцовая фреза с регулируемым шагом зубьев инструмента:
1 – корпус; 2 – резец; 3 – болт; 4 – гайка; 5 – шайба



Рис. 3. Модуль ZET LAB 220

Также он предназначен для решения задач измерения и управления в области сейсмоки, вибраций, термометрии, тензометрии и т.д. Программа из состава ZET LAB 220 обрабатывает сигналы, поступающие на входные каналы анализаторов спектра, сейсмостанций, тензостанций, плат АЦП ЦАП, интеллектуальных датчиков.

Сигналы на модуль подаются при помощи токовихревого бесконтактного датчика AP2000A.

Бесконтактный токовихревой датчик (см. рис. 1, поз. 4) измеряет динамическое или ста-

тическое перемещение объекта относительно места крепления. Измерительная система состоит из бесконтактного датчика, демодулятора (драйвера) и соединительного кабеля. Эти системы обычно используются для измерения радиальной и осевой вибрации, эксцентриситета и осевого перемещения вала, расширения кожуха и разностного расширения и других случаях, где бесконтактные, относительные измерения должны быть произведены.

Настройка оборудования и инструмента

При настройке оборудования перед работой были проведены следующие измерения: измерение частоты собственных колебаний заготовки в направлении продольной подачи, измерение действительной частоты вращения шпинделя и настройка углового шага торцовой фрезы.

Измерение собственной частоты заготовки проводится следующим образом: токовихревой датчик вкручивается в отверстие приспособления, как показано на рис. 1, затем ударом молотка по поверхности приспособления создается импульсное воздействие в продольном направлении подачи. В момент удара записываются сигналы токовихревого датчика при помощи модуля ZET LAB 220, которые отображаются на экране ЭВМ в виде виброграмм, изображенных на рис. 4.

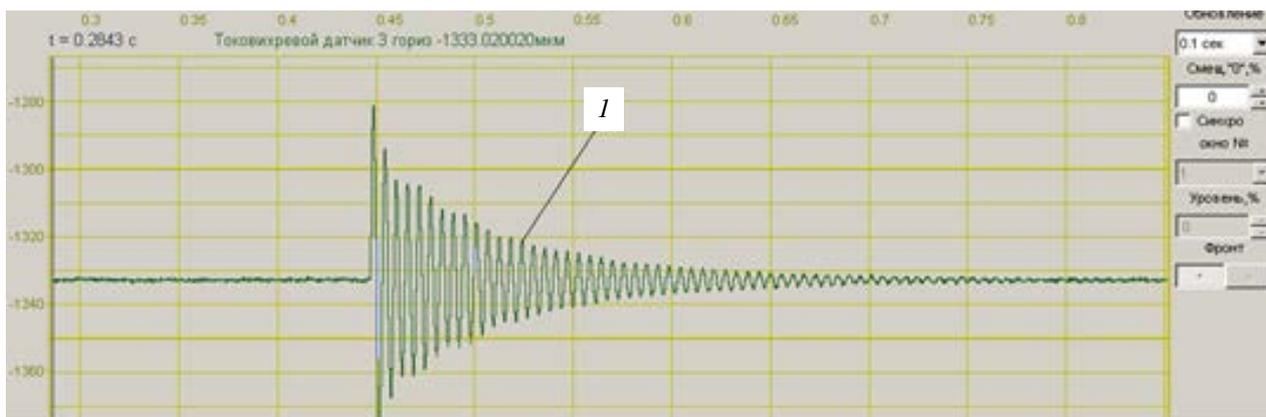


Рис. 4. Виброграммы собственных колебаний заготовки:

I – среднее значение

Собственная частота колебаний заготовки перед каждым опытом сведена в табл. 1.

1. Собственные частоты колебаний заготовки

№ опыта	$f_{\text{заг}}$, Гц
1	150
2	152
3	149
4	150
5	149
6	150
7	152
8	152
9	149
10	150
11	149

Для расчета длины волны производилось измерение действительной частоты вращения шпинделя станка 6М82. Измерение осуществлялось при помощи токовихревого датчика, закрепленного в магнитной стойке и установленного на направляющую возле шпинделя фрезерного станка, как показано на рис. 5.

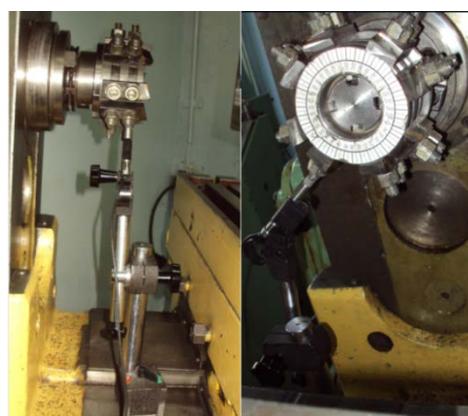


Рис. 5. Измерение действительной частоты вращения шпинделя

Измерения частоты вращения шпинделя проводились на холостом ходу без нагрузки. Частота вращения шпинделя на холостом ходу без нагрузки измерялась в диапазоне 200...630 об/мин.

Обработанные показания действительной частоты вращения шпинделя сведены в табл. 2.

2. Действительные частоты вращения шпинделя станка

Номинальная частота вращения шпинделя $n_{\text{ном}}$, об/мин	Действительная частота вращения шпинделя $n_{\text{деств}}$, об/мин	Отклонения действительной частоты вращения шпинделя от номинальной, %
200	210,0	+5,00
250	256,2	+2,40
315	336,0	+6,25
400	418,8	+4,50
500	507,0	+1,38
630	652,2	+3,40

Настройка углового положения зубьев экспериментальной фрезы 1 осуществлялась при помощи оптической делительной головки 2, штангенрейсмуса 3, жесткого упора 4, контроль осуществлялся индикаторной головкой часового типа 5 с ценой деления 0,01 мкм оптической делительной головки, изображенной на рис. 6.

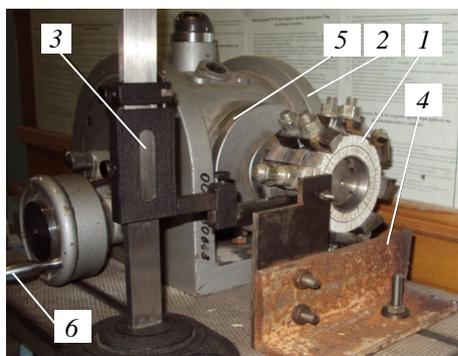


Рис. 6. Приборы и инструмент для настройки углового шага торцевой фрезы:

1 – торцевая фреза; 2 – оптическая головка ОДГ-2; 3 – штангенрейсмус; 4 – жесткий упор; 5 – шкала индикаторной головки; 6 – рукоятка

После каждой настройки фрезы на разношаговость ΔE производится проверка радиального и торцевого биения зубьев.

Проверка осевого биения зубьев по их вершинам и радиального биения по главной режущей кромке резца осуществляется с помощью индикаторной головки часового типа с

ценой деления 0,005 мм. Измерительный индикатор закрепляется в стандартной индикаторной стойке, которая устанавливается на столе заточного станка. Проверка радиального биения зубьев показана на рис. 7.

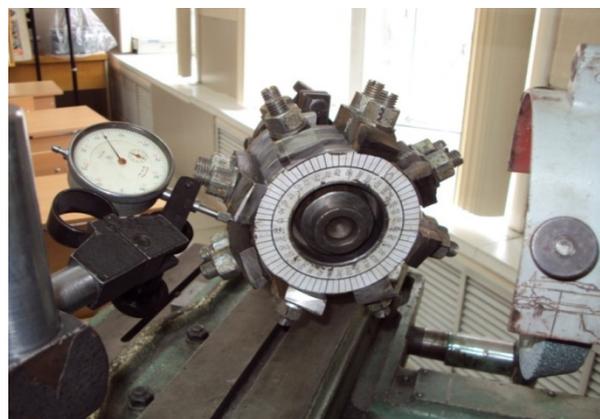


Рис. 7. Проверка радиальных биений зубьев фрезы на заточном станке

Проверка торцевого биения по вершинам резца экспериментальной фрезы проводится на оптической головке ОДГ-2 при помощи измерительного индикатора с ценой деления 0,005 мм, закрепленного на магнитную стойку. Измерение торцевого биения фрезы показано на рис. 8.

Снятые показания измерений радиальных и торцевых биений зубьев перед каждым опытом приведены в табл. 3.

3. Результаты измерений радиальных и торцевых биений зубьев фрезы

№ опыта	Радиальное биение, мкм/торцевое биение, мкм							
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
1	30/0	20/-30	20/10	0/-40	0/-10	-5/-20	-5/20	5/-30
2	-30/0	-15/20	0/30	-25/35	10/25	5/10	-10/-5	-5/10
3	-20/25	0/30	0/0	0/50	10/40	-20/0	5/5	-5/10
4	10/10	15/-15	0/0	20/20	25/30	5/15	20/35	0/10
5	0/0	-20/20	0/-20	10/30	-5/-10	5/15	10/50	10/50
6	0/20	5/-30	20/5	30/0	5/10	-5/10	20/-40	35/-35
7	0/-10	30/-30	20/0	-20/-30	-30/-50	5/-5	-20/10	20/-10
8	10/20	15/5	0/0	20/30	10/0	5/10	-5/30	20/40
9	-30/-30	-25/-5	0/0	-10/40	20/30	20/20	5/25	20/20
10	15/-30	-10/30	0/0	20/30	-15/0	-10/20	20/50	30/-30
11	0/0	-20/10	-25/30	5/-15	0/-20	0/0	-10/10	5/0

Проверка биений зубьев фрезы перед работой показала, что радиальное биение не превышает допустимое 0,02...0,06 мкм, а торцовое биение не превышает допустимое 0,05...0,1 мкм.

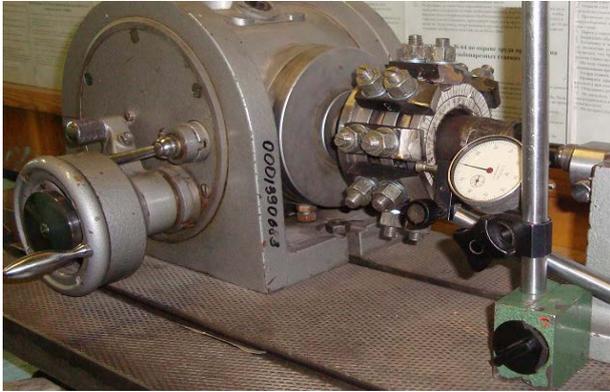


Рис. 8. Проверка торцовых биений зубьев фрезы на оптической головке ОДГ-2 после настройки углового шага зубьев

Методика проведения исследований

Исследования вибраций ТС при торцовом фрезеровании со ступенчатым регулированием углового шага зубьев проводили при обработке заготовок из стали 10 ГОСТ 1050-88 твердостью 187 НВ торцовой фрезой с регулируемым шагом, $D = 125$ мм, оснащенной пластинками из твердого сплава Т5К10, обеспечивающими работу при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, с геометрическими параметрами: $\varphi = 60^\circ$; $\gamma = -5^\circ$; $\gamma_{ac} = -15^\circ 30'$; $\gamma_{\pi} = -3^\circ 25'$; $\alpha = 16^\circ$; $\lambda = 15^\circ$; $f = 0,8 \dots 1,5$ мм; $n = 3 \dots 5,5$ мм, представленными на рис. 9.

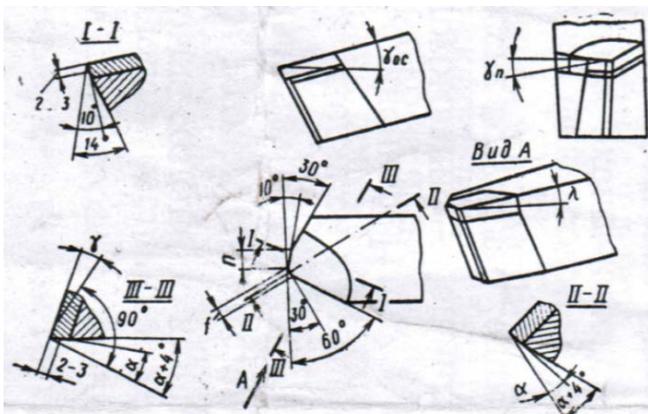


Рис. 9. Геометрические параметры зуба фрезы

Для проведения исследований была проведена серия опытов с различными значениями числа зубьев Z фрезы.

Серия опытов была посвящена определению эффективности одновременного подавления вынужденных и автоколебаний ТС в условиях малой жесткости путем ступенчатого регулирования углового шага ΔE зубьев фрезы от 0° до 10° . Исследования проводились на горизонтально-фрезерном станке 6М82 при помощи приспособления, имитирующего нежесткую технологическую систему фрезой $D = 125$ мм, $Z = 8$, оснащенной режущими пластинками из твердого сплава Т5К10, расстояние между подкладками составляет $L = 205$ мм, а ее жесткость в направлении продольной подачи $j = 349025$ Н/м, ширина фрезерования $B = 75$ мм. Режимы резания для проведения опытов: $n_{ном} - 400$ об/мин; $n_{действ} - 419,58$ об/мин; $t - 2$ мм; $s_{мин} - 500$ м/мин; $s_z - 0,15$ м/зуб; $v_{рез} - 2,746$ м/с. Значение ΔE° составило, соответственно номеру опыта: 1 – 4; 2 – 5; 3 – 6; 4 – 7; 5 – 8; 6 – 9; 7 – 10; 8 – 3; 9 – 2; 10 – 1.

Для уменьшения влияния систематических погрешностей, вызванных различными неучтенными условиями, последовательность проведения опытов рандомизировалась. Каждый опыт повторялся три раза, а параметры вибраций определялись, как среднее арифметическое трех измерений.

Результаты основных серий опытов

Серия опытов была посвящена исследованиям влияния ступенчатой разношаговости на подавление автоколебаний при обработке нежесткой заготовки.

В результате проведения первой серии опытов получены виброграммы и спектрограммы колебаний, изображенные на рис. 10 – 14.

В результате проведения первой серии опытов получены графики размаха колебаний и амплитуды колебаний, изображенных на рис. 15, 16.

Из графика, изображенного на рис. 15, видно, что размах R колебаний заготовки при величине угловой разношаговости зубьев $\Delta E = 5^\circ$ уменьшился вдвое, а на графике, изображенном на рис. 16, видно, что при разношаговости 5° амплитуда уменьшилась в 5 раз по сравнению с равномерным расположением зубьев.

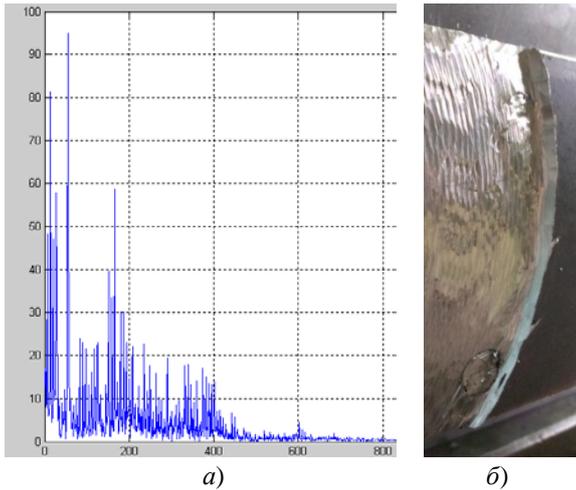


Рис. 10. Опыт 1 при равномерном расположении резцов:
а – спектрограмма токовихревого датчика;
б – фотография поверхности резания

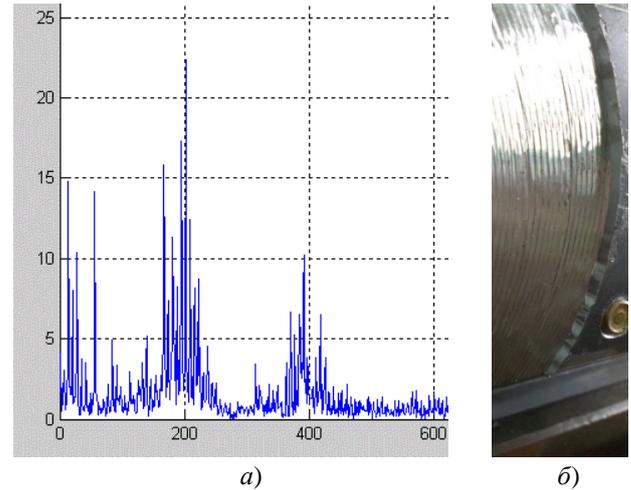


Рис. 11. Опыт 4 при смещении резцов на -5° :
а – спектрограмма токовихревого датчика;
б – фотография поверхности резания

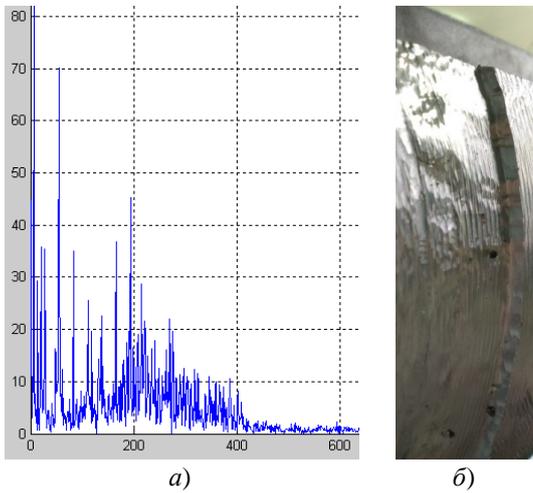


Рис. 12. Опыт 9 при смещении резцов на -10° :
а – спектрограмма токовихревого датчика;
б – фотография поверхности резания

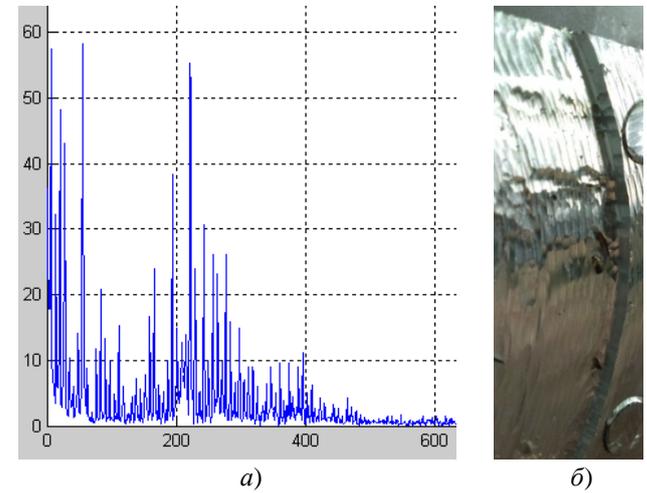


Рис. 13. Опыт 10 при смещении резцов на -2° :
а – спектрограмма токовихревого датчика;
б – фотография поверхности резания

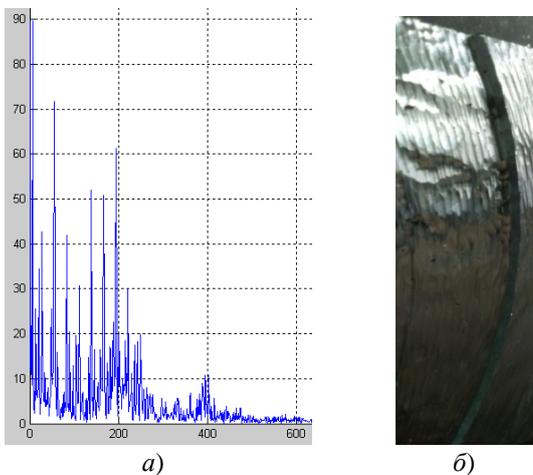


Рис. 14. Опыт 11 при смещении резцов на -1° :
а – спектрограмма токовихревого датчика;
б – фотография поверхности резания

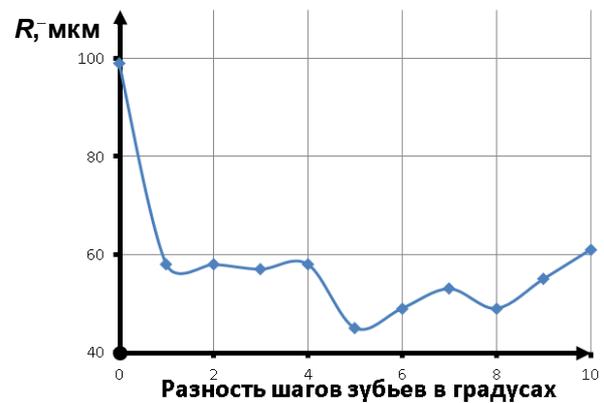


Рис. 15. Влияние ступенчатой разности шагов ΔE на размах R колебаний заготовки

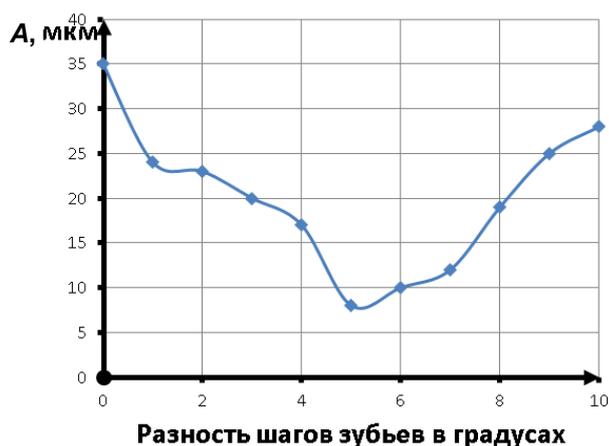


Рис. 16. Влияние ступенчатой разности шагов ΔE на амплитуду A автоколебаний

Выводы

Разработана методика исследования вибраций ТС при торцовом фрезеровании в условиях пониженной жесткости технологической системы.

Проведено исследование эффективности подавления вынужденных колебаний технологической системы, путем использования ступенчатой разношаговости зубьев. Установлено, что ступенчатая разношаговость зубьев позволяет подавлять автоколебания на 50 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проблемы станкостроения США // Автоматические линии и металлорежущие станки. Пер. с англ. А.И. Смирнов. – М.: 1983. – №17.
2. Хрунев, Ю.М., Дыжин, В.А. Торцовые фрезы с механическим креплением пластин // Машиностроитель. – №3. – 1986. – С. 20-21.
3. Васин, С.А., Верещака, А.С., Кушнер, В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. Учеб. для техн. вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.
4. Вульф, А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
5. Грановский, Г.И. Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1985. – 303 с.
6. Кудинов, В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
7. Розенберг, А.М. Динамика фрезерования. – М.: Советская наука, 1945.
8. Пузанов, Ю.В. Исследование устойчивости движения системы при торцовом фрезеровании.: дис. ... канд. Техн. Наук. – Ленинград, 1980. – 238 с.
9. Кучма, Л.К. Вибрации при обработке на фрезерных станках и методы их гашения. – М.: ВИНТИ, 1959. – 81 с.

10. Прилуцкий, В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.

11. Раздобреев, А.Х. О неравномерном шаге зубьев фрез. – В кн.: Технологичность в механосборочном производстве. – Рязань, 1977. – С. 117-120.

12. Свинин, В.М. Фрезерование с модулированной скоростью резания / Под ред. А.И. Промптова. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 304 с.

13. Четвериков, С.В. Экспериментальное изучение влияния дополнительной заточки режущих пластин торцовой фрезы на эффективность подавления возникающих автоколебаний // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – №4.

REFERENCES

1. Problems of machine tool construction in the USA. Automatic lines and metal-cutting machines. Translated from English by A.I. Smirnov, Moscow, 1983, no. 17.
2. Khruney, Yu.M., Dyzhin, V.A. Face milling cutters with mechanical fastening of plates / Mashinostroitel', no. 3, 1986, pp. 20-21.
3. Vasin, S.A., Vereshchaka, A.S., Kushner, V.C. Cutting materials: Thermo-mechanical approach to the system of interconnections during cutting: textbook for technical universities. / S.A. Vasin, A.S., Vereshchaka, V.S. Kushner/Moscow: Publishing house of N.E. Bauman MSTU, 2001, 448 p.
4. Wolf, A.M. Metal cutting. Ed. 2-nd, Moscow: Mashinostroenie, 1973, 496 p.
5. Granovsky, G.I. Cutting metals / Moscow: Higher School, 1985, 303 p. (in Russ.)
6. Kudinov, V.A. Dynamics of machine tools / Moscow: Mashinostroenie publ., 1967, 359 p. (in Russ.)
7. Rosenberg, A.M. Dynamics of milling operation / Moscow: Sovetskaya nauka, 1945.
8. Puzanov, Yu.V. Investigation of the dynamical stability of bulk movement during face milling. Candidate's thesis, Leningrad, 1980, 238 p.
9. Kuchma, L.K. Vibrations in machining operation on millers and methods of their dampening. Moscow: VINITI, 1959, 81 p.
10. Prilutsky, V.A. Technological methods for reducing surface undulation / Moscow: Mashinostroenie, 1978, 136 p.
11. Razdobreev, A.H. About the uneven pitch of the teeth of the milling cutters. The book: Manufacturability in mechanical assembly production / Ryazan, 1977, pp. 117-120.
12. Svinin, V.M. Milling with modulated cutting speed / Edited by A.I. Promptov/ Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2007, 304 p.
13. Chetverikov, S.V. Experimental study of the effect of additional grinding operation of cutting instrumentality of face milling cutter on the effectiveness of suppression of emerging self-oscillations / Modern technologies. System analysis. Modeling, 2021, no. 4.

Статья поступила в редакцию 08.12.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 30.01.2022.

The article was submitted 08.12.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 30.01.2022.