УДК 621.914.1

Ю.Н. Внуков
д.т.н., профессор,
Запорожский национальный технический университет
e-mail:
yvnukov@zntu.edu.ua

С.И. Дядя
к.т.н., доцент
Запорожский национальный технический университет
e-mail:
djadja@zntu.edu.ua

Е.Б. Козлова
ст. преподаватель,
Запорожский национальный технический университет
e-mail:
kozlova@zntu.edu.ua

А.Е. Зубарев
ведущий инженер
АО «Мотор Сич»
andreyzub@gmail.com

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ С РАЗНОНАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ

Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев. Разработка комплекса экспери-ментальных мето-дик исследования вибро-устой-чивости процесса резания концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями. В статье описана конструкция экспери-ментальной фрезы и комплекс методик для оценки влияния косоугольности резания и разнонаклонности зубьев фрезы на условия возбуждения и подавления колебаний при концевом цилиндрическом фрезеровании.

Y.N. Vnukov, C.I. DjaDja, E.B. Kozlova. A.E. Zubarev Development of Experimental Techniques to Study Vibration Cutting Process End Mills With Multidirectional Teeth. This article presents experimental methodology of measurement cutting conditions and surface finish formation in thin wall end milling. Also thin walls end milling influence on efficiency and dimensional accuracy is shown.

Анализ современных каталогов зарубежных фирм, выпускающих концевые цилиндрические фрезы, приведенный в таблице 1, показывает, что одним из направлений снижения вибраций является расширение использования фрез с разнонаклонными зубьями. Рекомендации фирмы Guhring [1] по применению фрез с разнонаклонными зубьями приведены в таблице 2.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

Информация, приведенная в таблицах показывает, что несмотря на широкий диапазон свойств обрабатываемых материалов и значений номинального угла наклона винтовой режущей кромки на цилиндрической поверхности фрезы ω=35°…45°, разнонаклонность режущих зубьев $\Delta\omega$ имеет незначительную величину, от 2 до 4°.

Исследованиями Stone B.J. [2] показано, что максимальный эффект в увеличении ширины безвибрационного фрезерования достигается при изменении угла наклона смежных зубьев до 4° (рис. 1). Дальнейшее увеличение $\Delta\omega$, мало влияет на повышение вибростойкости процесса фрезерования.

Таблица 1 - Фрезы с разнонаклонными зубьями, выпускаемые разными фирмами

№п/п	Производитель	Число зубьев, z	Угол наклона режущей кромки, ω_1/ω_2	Обрабатываемый материал	Примечания, $\Delta\omega$
1	ООО "Инстроника", Россия	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3
		3	33/35/37	Сталь, чугун, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	2
		4	41/44	Нержавеющая сталь, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	3
2	ООО "Техтрейд", Россия	4	35/38	Материалы выше 60 HRC	3
3	Maykestag, Австрия	3	34/36	Труднообрабатываемые материалы, титановые сплавы выше 50 HRC	2
		4	35/38		3
		4	39/42		3
4	MITSUBISHI, Япония	4	37/40	Сталь, чугун, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	3
5	ARNO, Германия	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3
		4	26/30		4
		5	35/38		3
6	PARA Tooling, Европа	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

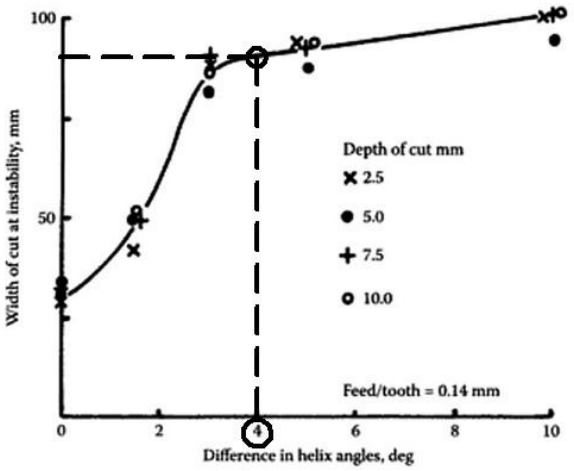
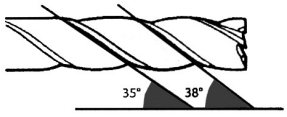
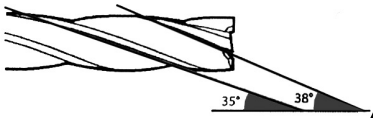
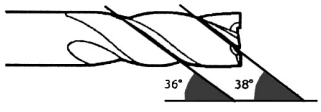
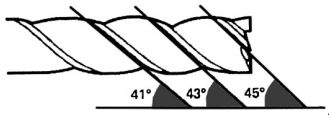
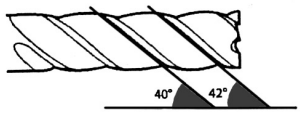
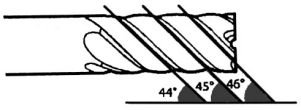
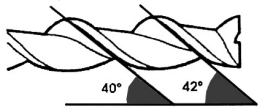
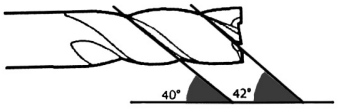


Рис. 1 Влияние разницы в углах наклона соседних зубьев Δω на ширину безвибрационного фрезерования [2]

Таблица 2 Рекомендации фирмы Guhring по выбору фрез с разнонаклонными зубьями [1]

RF 100 U **(Тип N)**  **Δω=3°**	**Спираль 35°/38°.** **Черновая и чистовая обработка стали, высоколегированной и закаленной стали:** **- предел прочности на разрыв 1600 Н/мм^2** **- твердость 48 HRC**
RF 100 Ti **(Тип N)**  **Δω=3°**	**Спираль 35°/38°.** **Обработка канавок, черновая обработка титановых сплавов.**
RF 100 VA **(Тип N)**  **Δω=2°**	**Спираль 36°/38°.** **Черновая и чистовая обработка нержавеющих материалов.**
RF 100U **(Тип N) 3 лезвия**	**Спираль 41°/43°/45°.** **Черновая и чистовая обработка высоколегированных и закаленных сталей:**

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

 **Δω=2°÷4°**	**- предел прочности на разрыв 1400 Н/мм^2** **- твердость 44 HRC**
RF 100F **(Тип NH)**  **Δω=2°**	**Спираль 40°/42°.** **Черновая и чистовая обработка мягких и вязких сталей, а также прочих длинностружечных материалов:** **- предел прочности на разрыв 850 Н/мм^2;** **- твердость 25 HRC.**
RF 100 SF **(Тип NH)**  **Δω=1-2°**	**Спираль 44°/45°/46°.** **Чистовая обработка HSC. Получерновая обработка с шириной до 0,3D и черновой обработки HPC по всей длине режущей кромки стандартной стали, чугуна, цветных металлов и высоколегированных материалов.**
RF 100 A **(Тип W)**  **Δω=2°**	**Спираль 40°/42°.** **Черновая и чистовая обработка алюминия, алюминиевых сплавов, длинностружечных материалов и цветных металлов.**
RF 100 H **(Тип H)**  **Δω=2°**	**Спираль 40°/42°с увеличенной сердцевиной.** **Черновая обработка до 1xD материалов твердостью до 54 HRC, для чистовой обработки по всех длине режущей кромки материалов твердостью до 60 HRC.** **Пригодна для черновой обработки материалов твердостью более 60HRC.**

В отечественной литературе также описаны конструкции фрез с разнонаклонными зубьями [3], где при широком диапазоне изменения угла ω=30°…45° разницу в углах наклона Δω рекомендовали от 2° до 10° в за-

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

висимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала, диаметра фрезы, величины и равномерности припуска, а также от жесткости системы СПИД. Основным механизмом, повышающим стойкость и улучшающим условия резания при работе фрезами с разнонаклонными зубьями, считали [4] ослабление вредного влияния наклепа вследствие несовпадения следов последующего и предыдущего зубьев, снижение вибраций, а также изменение направления схода стружки, влияющего на фактический передний $\gamma_ф$ и задний $\alpha_ф$ углы.

Отраслевой стандарт [5] на фрезы концевые диаметром от 10 до 25 мм из быстрорежущей стали с чередующимися разнонаклонными режущими зубьями для обработки нержавеющих сталей, жаропрочных и титановых сплавов предусматривает конструкции двух типов фрез.

Тип 1 – 4-х зубая фреза с углами наклона режущих зубьев $\omega_1=38°8'$ и $\omega_2=36°12'$, где $\Delta\omega\approx2°$.

Тип 2 – 6-ти зубая фреза с углами наклона режущих зубьев $\omega_1=38°8'$ и $\omega_2=34°54'$, где $\Delta\omega\approx3°$.

Можно видеть, что для различных по свойствам труднообрабатываемых материалов номинальный угол наклона зуба фрезы принят постоянным $\omega_1=38°8'$, а угол наклона последующего зуба отличается всего на 2° и 3°.

ГОСТом 17025-71 [6] предусмотрено изготовление концевых фрез диаметром от 2 до 28 мм с нормальным зубом и углом наклона $\omega=30°…35°$, а фрез с крупным зубом от 2 до 12 мм с углом наклона $\omega=35°…45°$.

Поводя итоги можно заметить, что многолетний опыт эксплуатации концевых фрез определил оптимальные значения углов наклона зубьев ω от 30° до 45°, и углов их разнонаклонности $\Delta\omega$ от 2° до 4°, которое подтверждается каталогами фирм, выпускающих концевые фрезы и нормативной документацией.

И, тем не менее, открытыми остаются вопросы, связанные с влиянием сочетания этих углов на виброустойчивость при обработке различных обрабатываемых материалов.

На сегодня нет четкого, экспериментального подтверждения понимания по следующим вопросам:

1. Как величина наклона зуба - ω (от 0° до 60°) влияет на возбуждение и подавление вынужденных и автоколебаний при встречном и попутном фрезеровании? Другими словами, как уровень косоугольности фрезерования влияет на виброустойчивость обработки при различном направлении подачи.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

2. Как угол разнонаклонности зубьев Δω влияет на виброустойчивость процесса фрезерования при различных углах наклона зубьев ω (от 0° до 60°)? Другими словами неясно, при каких значениях ω, угол разнонаклонности Δω оказывает максимальное влияние на повышение виброустойчивости фрезы.

3. Как свойства обрабатываемого материала влияют на выбор значений углов ω и Δω? ОСТ 1.52760-85 рекомендует постоянные значения углов ω и Δω для обработки нержавеющих, жаропрочных и титановых сплавов [5], а сводная информация, приведенная в таблице 1, показывает, что для одних и тех же групп обрабатываемых материалов различные фирмы рекомендуют разные значения углов ω и Δω.

Целью настоящей статьи является описание комплекса разработанных методик для проведения исследований по определению влияния изменения косоугольности резания (угол ω) и разнонаклонности зубьев (угол Δω) на условия возбуждения и подавления колебаний при концевом цилиндрическом фрезеровании различных обрабатываемых материалов.

А. Конструкция и схема заточки концевой цилиндрической фрезы с изменяемыми углами наклона - ω и разнонаклонности Δω.

На рис.2 приведена конструкция 4-х зубой фрезы, которая подробно описана в работе [7]. Экспериментальная фреза позволяет изменять угол наклона режущей кромки ω от 0° до ±60°. Точность установки угла разнонаклонности Δω на микроскопе БМИ составляет 1′.

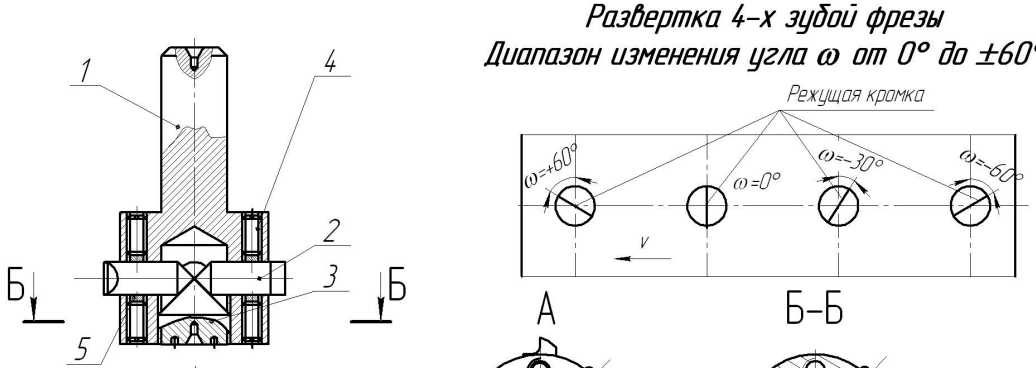
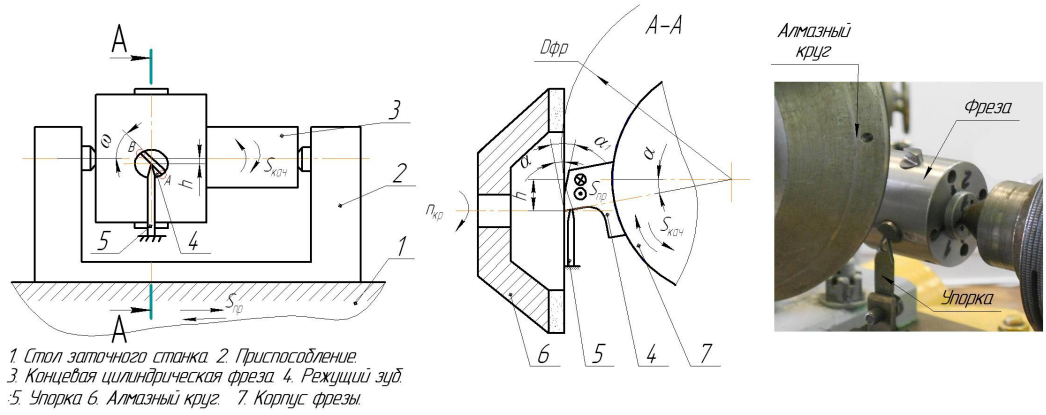


Рис. 2 Конструкция экспериментальной фрезы с изменяемыми углами ω и Δω

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

На рис.3 приведена схема алмазной заточки винтового режущего зуба экспериментальной фрезы по задней поверхности с упоркой – 5, установленной на переднюю поверхность.



1. Стол заточного станка. 2. Приспособление.
3. Концевая цилиндрическая фреза. 4. Режущий зуб.
5. Упорка 6. Алмазный круг. 7. Корпус фрезы.

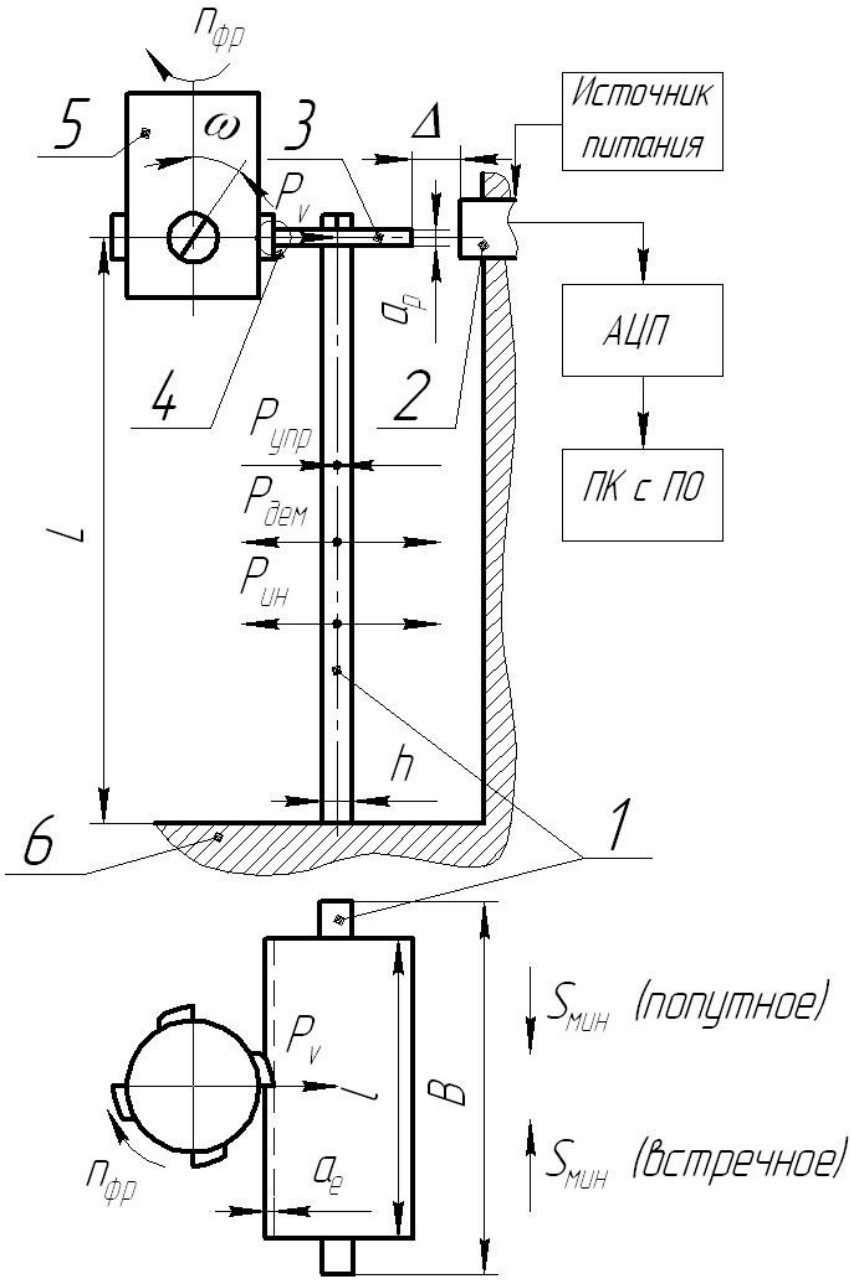
Рис. 3 Схема алмазной заточки винтового режущего зуба

<u>Б. Схема экспериментального стенда и системы измерения колебаний, возбуждаемых при концевом фрезеровании.</u>

На рис.4 представлена схема экспериментального стенда для исследования вибраций, возникающих при концевом фрезеровании. Конструкция экспериментального стенда подробно описана в работе [8]. Главной особенностью стенда, является возможность независимого изменения условий резания и динамических характеристик упругой системы (УС) детали (частоту собственных колебаний – ЧСК и характеристик демпфирования). Это позволяет исследовать (в нашем случае) влияние изменения углов ω и Δω фрезы на возбуждение колебании в УС детали под действием всех видов сил: вынуждающей (силы отталкивания - P_v), восстанавливающей (силы упругости – $P_{упр}$), силы демпфирования в УС детали – $P_{дем}$ и инерционной силы – $P_{ин}$.

Так как на УС детали одновременно действуют все 4 вида сил, которые в каждый момент времени имеют различную величину и направление, то отдельное их измерение невозможно (в отличии от измерения динамометром статических сил, при измерении силы резания). В этом случае достаточно просто записать закон движения детали под действием всех 4-х сил путем осциллографирования ее колебаний. На рис.5 приведена осциллограмма колебательного движения детали в разных временных масштабах при фрезеровании одним зубом. **действием всех видов сил, за определенный период времени - $\tau_{цикла}$.**

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015



1 – УС тонкостенной детали (пластина). 2 – Датчик перемещения обрабатываемого образца. 3 – Обрабатываемый образец (из различных материалов). 4 – Зона обработки фрезерованием. 5 – Концевая фреза с переменными ω и Δω. 6 – Приспособление для крепления пластины

Рис. 4 Схема экспериментального стенда

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

Такой подход позволяет точно измерять: период вынужденных колебаний (время между врезанием двух соседних зубьев) – $T_{зуб}$, период собственных колебаний детали – $T_{ЧСК}$, и период автоколебаний – $T_{ак}$ во время резания одним зубом, время резания - $\tau_{рез}$, и время холостого хода - $\tau_{х.х.}$.

Исследование колебаний по осциллограмме, приведенной на рис.5, удобнее проводить на одном из ее фрагментов, на отрезке времени между врезанием соседних (или очередного) зубьев, названным базовым фрагментом осциллограммы БФО. Таким образом, БФО – это базовый фрагмент осциллограммы колебательного перемещения детали по направлению ее минимальной жесткости под действием всех видов сил, возникающих за период обработки между моментами начала контакта двух соседних зубьев. БФО – это графическое изображение **закона движения тонкостенной детали** при фрезеровании под

В. Метод определения условий контактирования фрезы с деталью.

БФО имеет высокую информативность, однако, не всегда позволяет определить точку врезания и особенно точку выхода зуба фрезы из детали, которая совершает колебательные движения. При интенсивных автоколебаниях возможны случаи выхода зуба фрезы из зацепления со срезаемым припуском непосредственно во время одного реза. Для определения условий контактирования зуба фрезы с деталью разработана методика, схема которой показана на рис.6.

Во время контактирования зуба фрезы с деталью, замыкается электрический контакт, сигнал которого синхронизируется с осциллограммой колебания детали. Это позволяет на БФО точно отмечать точки начала контактирования, начала резания, выход зуба фрезы из припуска во время резания при автоколебаниях и точку выхода зуба из контакта. Очевидная задержка сигнала начала контактирования и начала резания (отклонение детали на БФО) позволяет исследовать роль радиуса округления режущей кромки ρ на процессы трения, пропахивания и резания при увеличении толщины среза во время врезания - $\tau_{вр}$ в условиях встречного фрезерования. Во время использования этой методики необходимо выдувать стружку из зоны резания воздушным потоком.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

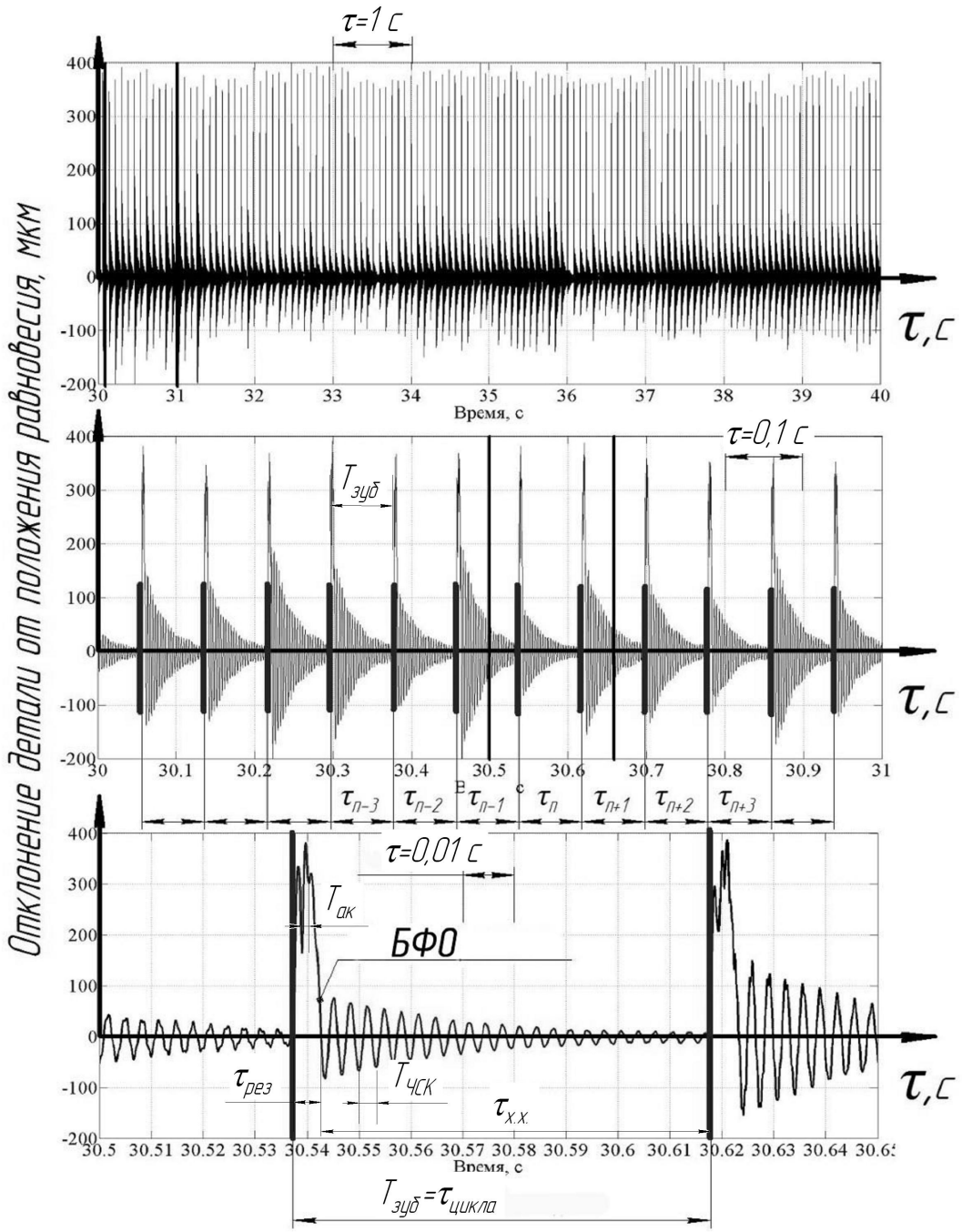


Рис. 5 Осциллограмма колебательного движения детали в разных временных масштабах

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

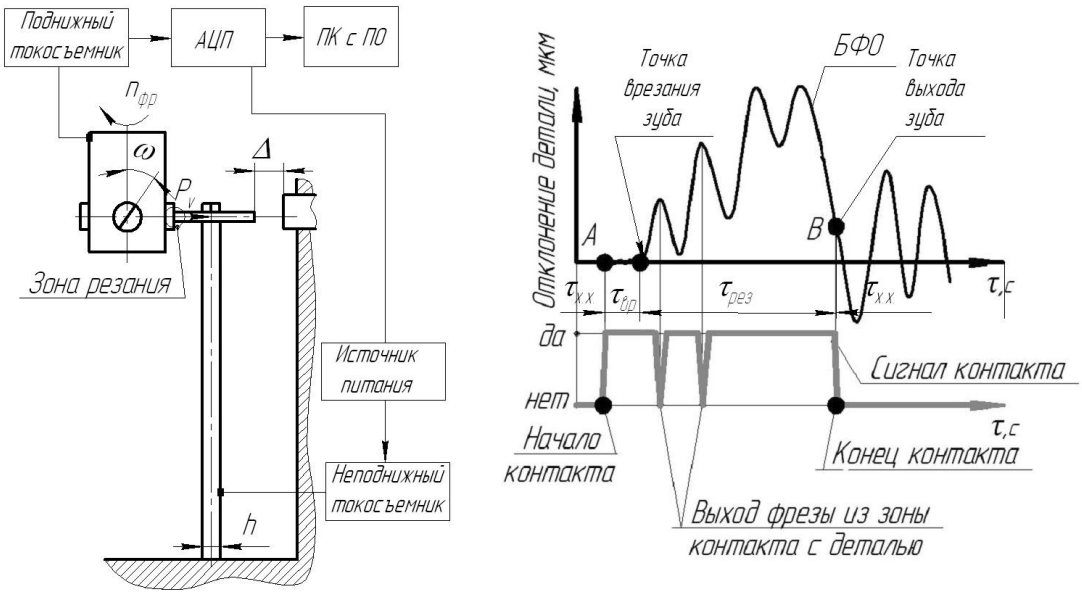


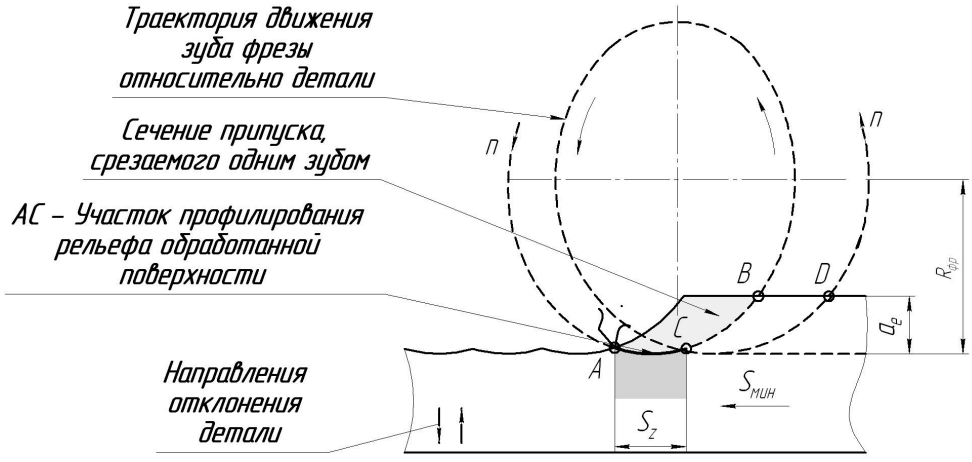
Рис. 6 Схема измерения условий контактирования зуба фрезы с деталью и синхронизация сигнала контакта с БФО

<u>Г. Связь формирования профиля обработанной поверхности с БФО.</u>

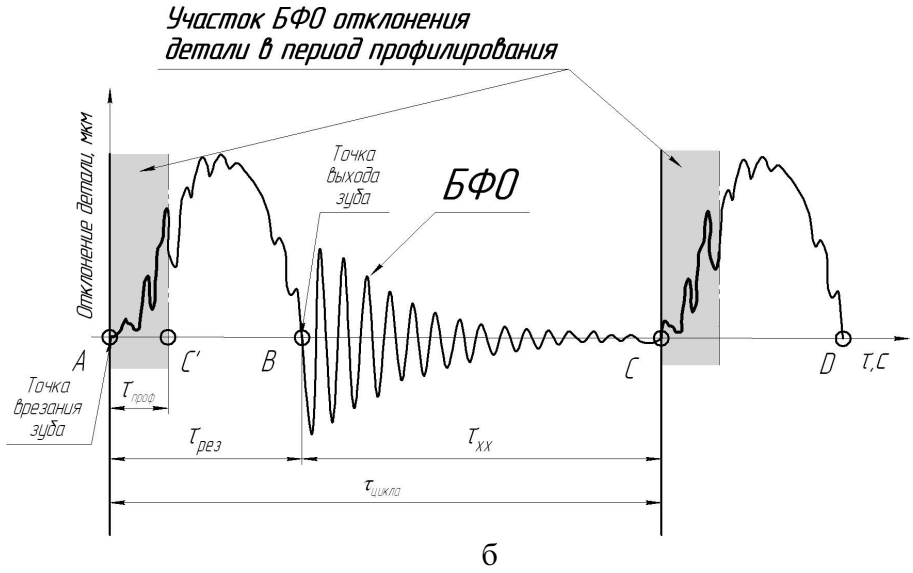
В работе [9] показано, что профиль обработанной поверхности (волнистость и шероховатость) определяется уровнем колебательного процесса тонкостенной детали при срезании припуска, только на участке профилирования. Величина этого участка определяется подачей на зуб S_z и интенсивностью колебательного движения детали.

На рис.7,а показана траектория движения зуба однозубой фрезы при удалении припуска толщиной – a_e. На первом обороте зуб входит в припуск в точке А и выходит в точке В. На следующем обороте входит в припуск в точке С, смещенной относительно точки А на величину подачи на зуб S_z и выходит в точке D. Таким образом, после двух резов на обработанной поверхности остается участок АС который является частью поверхности резания АВ при первом обороте фрезы. Исходя из этого можно предположить, что на БФО отклонения детали (рис.7,б) время ее резания - $\tau_{рез}$ определяется участком АВ, а участок ВС, показывает свободные затухающие колебания детали в то время - $\tau_{х.х.}$, когда зуб совершает холостой ход до очередного врезания в точке С.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015



а



б

Рис. 7 Схема связи формирования профиля обработанной поверхности – а, БФО отклонения детали – б (при встречном фрезеровании)

Таким образом, на БФО во время резания $\tau_{рез}$, нас интересует только участок $\tau_{проф}$, во время прохождения которого и формировался профиль обработанной поверхности. Поэтому очевидно, что уровень колебаний на участке БФО за время $\tau_{проф}$ и будет формировать качество обработанной поверхности, который назван периодом профилирования. Участок профилирования обработанной поверхности на БФО при встречном фрезеровании АС′ расположен в начале врезания зуба в припуск, а при попутном

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

фрезеровании в конце, при выходе зуба из припуска. Различия в интенсивности колебания на участках профилирования при встречном и попутном фрезеровании и определяет особенности формирования профиля при изменении направления подачи.

Д. Параметры оценки БФО.

На рис. 8 показан БФО, который может количественно характеризоваться 10 параметрами. Предложенные параметры полностью характеризуют не только динамические свойства УС детали, но и позволяют оценивать особенности ее движения непосредственно в процессе резания, когда зуб снимает припуск.

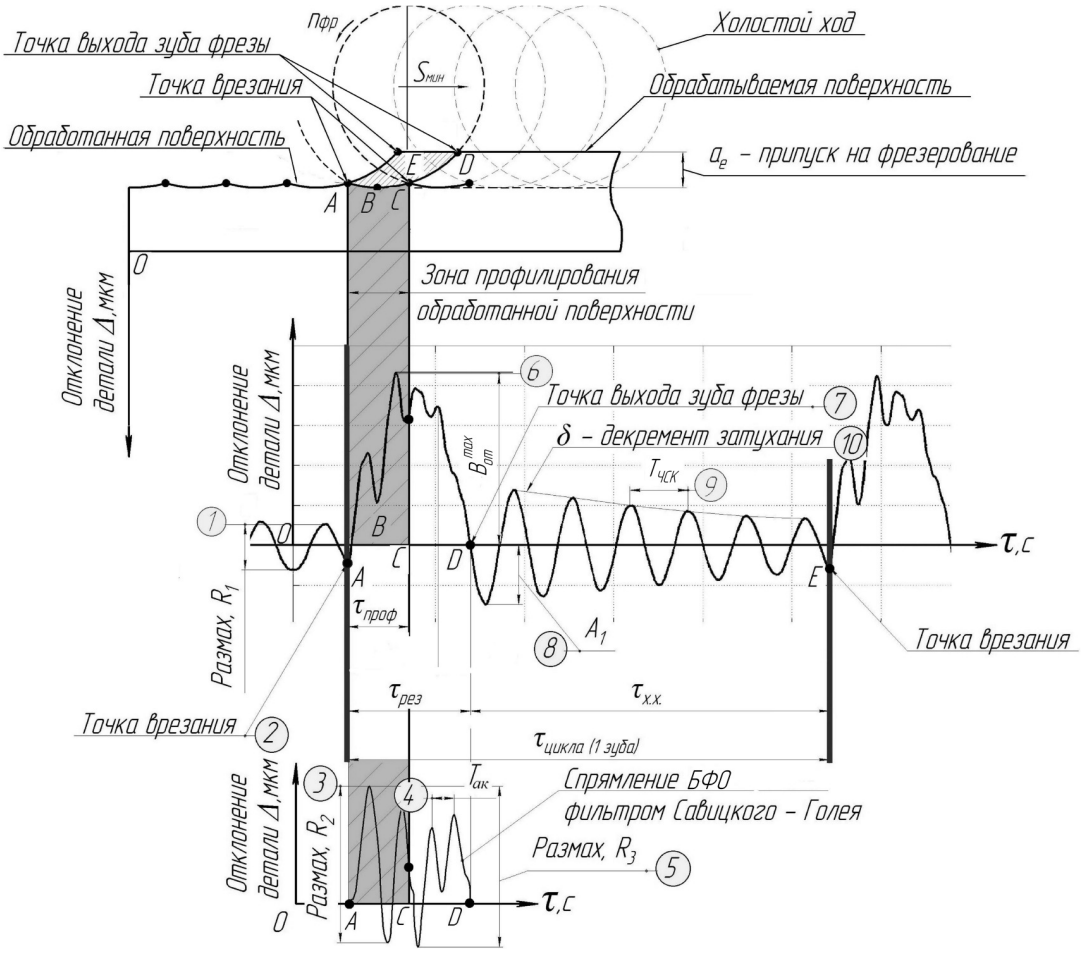


Рис. 8 Параметры оценки БФО

Итак, БФО позволяет определять:

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

1. Размах свободных затухающих колебаний детали перед врезанием зуба фрезы в припуск – R_1.

2. Точку врезания зуба фрезы в деталь. Необходимо использовать синхронизацию БФО с сигналом, определяющим наличие контакта.

3. Размах автоколебаний в зоне профилирования – R_2. Для точной оценки величин размаха колебаний R_2 и R_3 в период резания - $\tau_{рез}$ необходимо произвести спрямление БФО фильтром Савицкого-Голея [11].

4. Частоту автоколебаний во время срезания зубом фрезы $f_{àê} = \frac{1}{\grave{O}_{àê}}$

5. Максимальный размах автоколебаний – R_3 во время срезания всего припуска - $\tau_{рез}$.

6. Максимальное отклонение детали в результате воздействия всех видов сил P_v, $P_{упр}$, $P_{дем}$, $P_{ин}$ – $\hat{A}_{îò}^{\max}$.

7. Точку выхода зуба фрезы. Необходимо использовать синхронизацию БФО с сигналом, определяющим наличие контакта.

8. Амплитуду первой волны свободных затухающих колебаний детали – A_1.

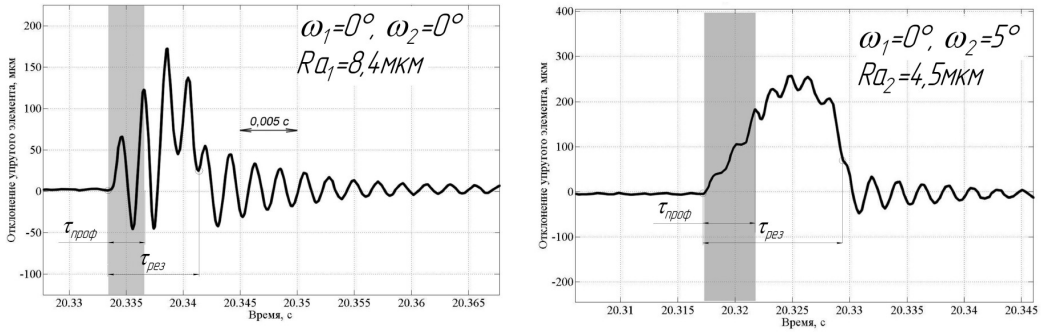
9. Частоту свободных затухающих колебаний детали $f_{\times\tilde{N}\hat{E}} = \frac{1}{\grave{O}_{\times\tilde{N}\hat{E}}}$ во время $\tau_{х.х.}$ – холостого хода зуба фрезы.

10. Логарифмический декремент свободных затухающих колебаний детали - δ во время $\tau_{х.х.}$ – холостого хода зуба фрезы.

<u>Е. Экспериментальная апробация разработанной методики исследования виброустойчивости процесса резания фрезами с разнонаклонными зубьями.</u>

На рис.9 приведены БФО при работе двумя двузубыми фрезами. У первой фрезы (рис.9, а) углы наклона обоих зубьев были равны ω_1=0° и ω_2=0° т.е. соблюдалось ортогональное (прямоугольное) резание и отсутствовала разнонаклонность зубьев $\Delta\omega$=0°. У второй фрезы (рис.9, б) углы наклона зубьев ω_1=0° и ω_2=5°, т.е. имелась разнонаклонность зубьев $\Delta\omega$=5°.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015



а б

Рис. 9 БФО отклонения детали при свободном цилиндрическом фрезеровании двузубыми фрезами с различными углами разнонаклонности Δω

а - ω_1=0°, ω_2=0°, Δω=0°; б - ω_1=0°, ω_2=5°, Δω=5°

Условия обработки: Сталь 3, n=224 об/мин, a_e =0,5 мм, a_p=4 мм, S_z=0,1 мм/зуб, $D_{фр}$=55 мм. Фрезерование встречное.

БФО отклонения детали показывает значительное влияние угла разнонаклонности зубьев Δω на характер колебательных процессов происходящих в зоне резания. Шероховатость обработанной поверхности во втором случае равна Ra_2=4,5 мкм и значительно (до 2-х раз) ниже, чем в первом Ra_1=8,4 мкм. Таким образом, показано, что разработанная авторами методология позволяет проводить широкие исследования по изучению проблем повышения виброустойчивости процессов фрезерования концевыми фрезами.

Выводы

Авторами разработана оригинальная конструкция фрезы и комплекс экспериментальных методик для изучения виброустойчивости концевых цилиндрических фрез с различными углами наклона - ω и разнонаклонности Δω режущих зубьев.

Литература

1. Guhring, Inc. (Каталог продукции) [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.guhring.com

2. Stone B. J. The Effect on Regenerative Chatter Behaviour of Machine Tools of Cutters With Different Approach Angles on Adjacent Teeth / Stone B. J., MTIRA Report // MTIRA. – №34. – 1970.

3. Крепак А. С. Высокопроизводительные концевые фрезы / А. С. Крепак. – Станки и инструменты. – 1968. – №7. – 41 с.

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015

4. Крепак А. С. Исследование процесса резания жаропрочных сталей концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями: автореф. дис. на соискание начн. степени канд. техн. наук: спец. 05.171 «Теория обработки резанием» / А. С. Крепак – Тула, 1972. – 23 с.

5. ОСТ 1.522760 Фрезы концевые с чередующимися разнонаклонными режущими зубьями. Конструкция и размеры [Текст]. – Введ. 1987–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1986. 25 с.

6. ГОСТ 17025-71 Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком. Конструкция и размеры [Текст]. – Введ. 1973–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1972. 24 с.

7. Конструкция экспериментальной концевой цилиндрической фрезы с изменяемыми углами винтовых режущих кромок / [С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Э. В. Кондратюк, А. В. Шевченко] // Вестник двигателестроения. – №1. – 2014. – С. 71–74.

8. Внуков Ю. Н. Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / Ю. Н. Внуков, В. А. Логоминов, П. А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011 – вып. 79 – с.32–37.

9. Логоминов В. А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. канд. техн. наук / В. А. Логоминов. – Запорожье, 2013., 226 с.

10. Гермашев А.И. Методика исследования колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей : зб. наук. праць за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих», 27 – 31 жовтня 2014 р. / Міністерство освіти і науки України, Сумський державний університет [та ін.], 2014, С.28–29.

11. Логоминов В. А. Методика исследования регенеративных автоколебаний по cut-граммам при фрезеровании тонкостенных деталей / В. А. Логоминов // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2014. – вип. 9. – С. 176–182.

Надійшла до редакції 17.01.2015

© Ю.Н. Внуков, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А. Зубарев, 2015