

УДК 621.914.2

Ю.Н. Внуков, д-р техн. наук, С.И. Дядя, канд. техн. наук,  
Е.Б. Козлова, В.А. Логоминов, канд. техн. наук,  
А.В. Шевченко, Запорожье Украина

## **ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ВИНТОВОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ КОНЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ НА УРОВЕНЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ**

*Описана методика кількісної оцінки вимушених і регенеративних коливань. Проаналізований вплив кута нахилу гвинтової різальної кромки циліндричної кінцевої фрези на збудження вібрацій при фрезеруванні тонкостінної деталі.*

*Описана методика количественной оценки вынужденных и регенеративных колебаний. Проанализировано влияние угла наклона винтовой режущей кромки цилиндрической концевой фрезы на возбуждение вибраций при фрезеровании тонкостенной детали.*

*Methodology of quantitative estimation of force and regenerative vibrations is described. Analysed the influence of angle of slope of spiral cutting edge of cylindrical end-capping milling cutter on excitation of vibrations at milling of the thin-walled detail.*

Детали, имеющие тонкостенные элементы широко применяются в авиакосмической отрасли, обработка которых ведется на современных станках с ЧПУ по технологии концевого фрезерования.

Существенной проблемой, в данном случае, является появление вынужденных упругих отклонений детали и вибраций в рабочей зоне, ухудшающих качество и точность обработки, а также приводящих к ускоренному износу инструмента и шпиндельного узла.

Исследованиями [1] установлено, что при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей, помимо вынужденных колебаний, связанных с входом и выходом зуба фрезы в припуск, в определенном скоростном диапазоне возникают регенеративные автоколебания. Природа этих колебаний объясняется появлением волнистости на поверхности резания. Поэтому, к переменной толщине среза, характерной для цилиндрического фрезерования добавляется дополнительное изменение толщины среза, связанное с регенерацией, т.е. резание по вибрационному следу на поверхности резания от предыдущего прохода зуба.

Одним из наиболее старых и эффективных способов снижения возбуждения колебаний при работе цилиндрическими фрезами является применение фрез с винтовыми режущими кромками.

Но, при финишном фрезеровании тонкостенных деталей, из-за малых

значений припуска, в зоне резания всегда находится только один зуб фрезы, поэтому условие равномерности фрезерования не реализуется. Однако, отклонение угла наклона винтовой режущей кромки -  $\omega$  от нулевого значения изменяет условие срезания припуска. Неравномерной становится ширина среза –  $b$ , увеличивается время срезания припуска -  $\tau_{рез}$ , появляется осевая (по отношению к оси концевой инструмента) составляющая силы резания, которая изменяет величину силы отжима  $P_{от}$  тонкостенной детали от инструмента. Более того, волны регенеративных колебаний, которые оставляет режущая кромка на поверхности резания, всегда располагаются строго параллельно ее направлению. Поэтому, если в конструкции инструмента предусмотреть винтовые режущие кромки с различными углами наклона, то каждый последующий зуб будет удалять волнистость, созданную предыдущим зубом, и тем самым будет разрушать механизм многократного возбуждения регенеративных колебаний.

Современное заточное оборудование с ЧПУ позволяет изготавливать концевые фрезы достаточно сложных конструкций с переменными углами винтовых режущих кромок, их переменным шагом и разной направленностью по отношению к вектору скорости резания. Поэтому, экспериментальное подтверждение возможностей эффективного подавления регенеративных колебаний путем изменения углов наклона винтовых режущих кромок будет являться основанием для разработки новых инструментов оригинальных конструкций, отличающихся повышенной вибростойкостью.

Для решения такой сложной динамической задачи экспериментальным методом, необходимо разработать методику наблюдения за вынужденными и автоколебаниями, которые возбуждаются в тонкостенной детали.

**Целью статьи** является описание методики и результатов экспериментальной проверки ее возможностей количественно оценивать уровень вибраций при условии изменения угла наклона винтовой режущей кромки у концевой цилиндрической фрезы.

На рис.1 приведена схема исследования процессов концевой фрезерования тонкостенной детали. Принципиальной особенностью этой схемы является возможность разделения зоны обработки и упругой системы (УС) тонкостенной детали.

Такой подход позволяет раздельно рассматривать процессы силового воздействия в зоне обработки – 4 от различных условий резания, при одинаковых статических и динамических характеристиках УС детали. И наоборот, оценивать влияние изменения статических и динамических характеристик УС детали, при неизменных условиях резания. Образец из обрабатываемого материала – 3, жестко закреплен на торце прямоугольной пластины – 1, моделирующей УС тонкостенной детали. Упругая пластина 1 установлена в специальном приспособлении – 6, которое жестко закреплено на рабочем столе фрезерного станка [2]. Изменением размеров пластины

(LxBxh) можно моделировать различные статические и динамические свойства тонкостенной детали. Более того, возможность установки дополнительной массы на пластине, а также окружение ее демпфирующей средой позволяет исследовать особенности обработки тонкостенных деталей, в широком диапазоне изменения их характеристик.

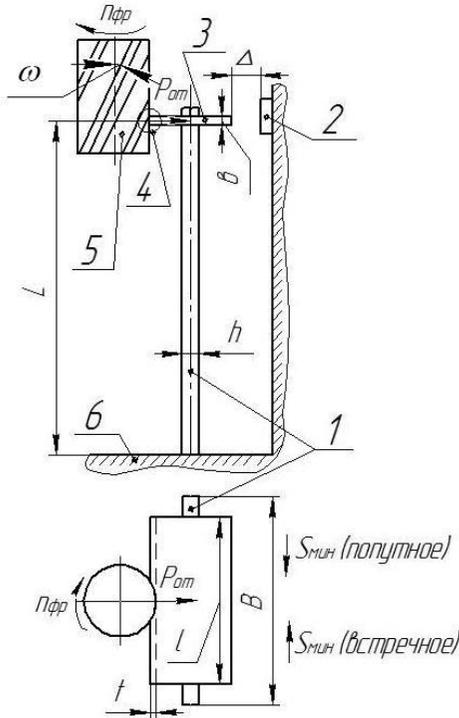


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования концевой цилиндрического фрезерования тонкостенной детали

- 1 – упругая система (УС) тонкостенной детали (пластина);
- 2 – датчик перемещения обрабатываемого образца;
- 3 – обрабатываемый образец;
- 4 – зона обработки фрезерованием;
- 5 – концевая цилиндрическая фреза;
- 6 – приспособление для крепления пластины.  $\omega$  – угол наклона винтовой режущей кромки.

При фрезеровании, в результате действия силы отжима  $P_{от}$  со стороны фрезы – 5, происходит упругое перемещение образца – 3, величину которого измеряют датчиком перемещения – 2 по изменению зазора –  $\Delta$ .

Датчик – 2 позволяет получать осциллограммы вынужденных и регенеративных автоколебаний детали при срезании припуска каждым зубом фрезы и определять скоростные зоны появления и интенсивность их возбуждения.

В качестве режущего инструмента применяли однозубую концевую цилиндрическую фрезу, конструкция которой показана на рис. 2

Конструкция фрезы состоит из одного или двух режущих зубьев – 1. Второй зуб может быть установлен вместо пробки – 3 при исследовании

условий роботи фрези з різнонахилними зубьями. На циліндричній поверхності режущого зуба має бути різьба, що дозволяє поворачивати зуб на кут  $\omega$  в діапазоні  $\pm 45^\circ$ . Режущий зуб закріплюється в корпусі – 2 винтом – 4 через свинцеву прокладку – 5. Прокладка – 5 перешкоджає пошкодженню різьби на режущому зубі і забезпечує надійне його кріплення в корпусі від проворачивання. Після установки необхідного кута –  $\omega$ , режущий зуб заточували по задній поверхності на упорку о передню поверхність, забезпечиваючи винтову форму режущої кромки АВ.

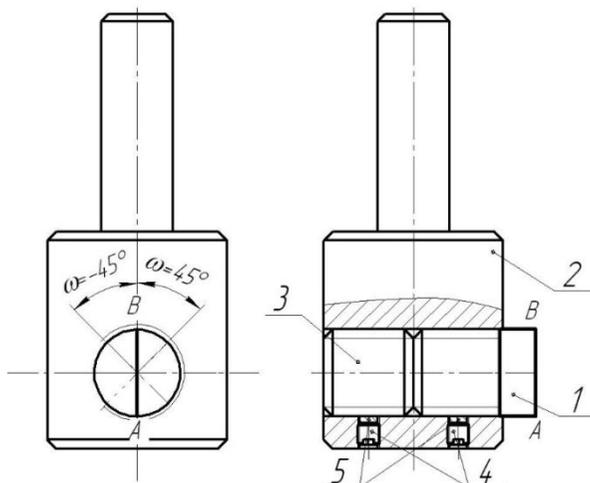


Рисунок 2 – Конструкція експериментальної кінцевої циліндричної фрези з можливістю зміни кута нахилу винтової режущої кромки АВ -  $\omega$   
1 – режущий зуб, 2 – корпус фрези, 3 – пробка,  
4 – винт, 5 – свинцеві прокладки

Для кількісного дослідження вимушених і регенеративних коливань розроблена методика розділення осцилограмм коливань тонкостінної деталі шляхом використання фільтра Савицького-Голея [3].

На рис. 3 показано принцип розділення вимушених і регенеративних автоколивань в результаті чого, можна кількісно визначати величину максимального відхилення деталі –  $V_{\max}$ , викликану силою віджиму -  $P_{\text{от}}$  при срезанні припуску з змінною товщиною среза одним зубом, а також максимальний розмах регенеративних автоколивань –  $2A_{\max}$ , при проходженні цим же зубом фрези поверхні різання. Застосування цієї методики дозволяє точно визначити вплив зміни кута нахилу винтової режущої кромки фрези -  $\omega$  на динамічні характеристики процесу срезання припуску одним зубом.

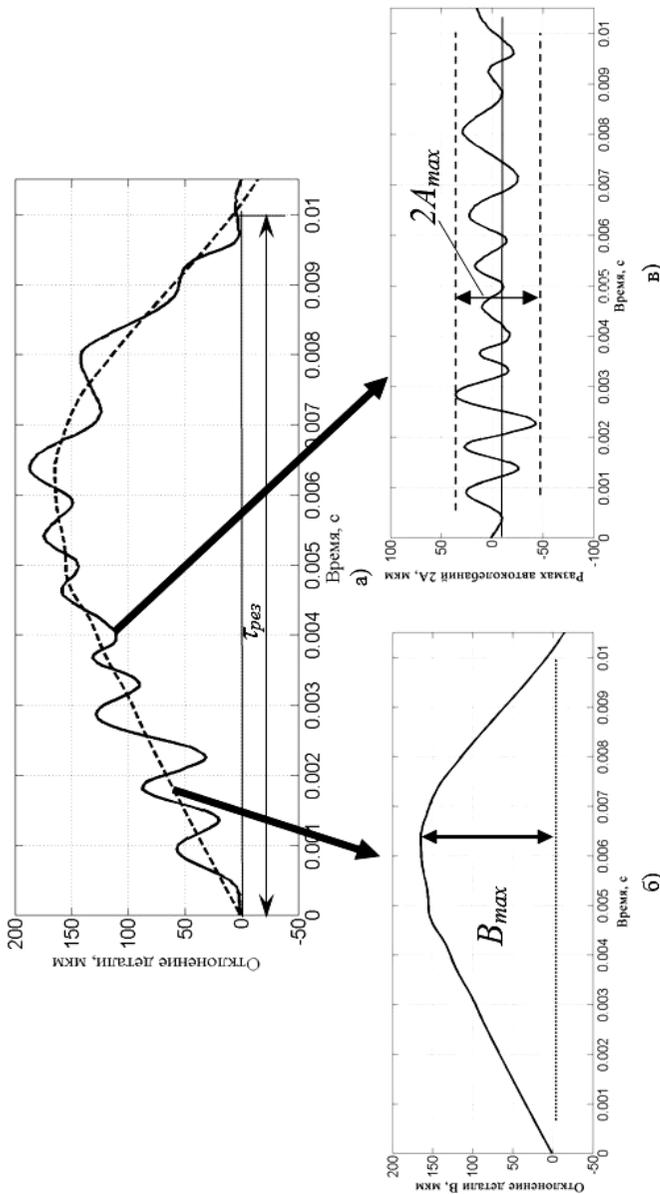


Рисунок 3 – Методика разделения вынужденных и регенеративных автоколебаний детали по осциллограммам с использованием фильтра Савицкого-Гольца.

а) Осциллограмма перемещений детали в период резания одним зубом; б) Перемещение детали – В силой отжима  $F_{от}$  (вынужденные колебания); в) Виброперемещение детали –  $2A$  из-за автоколебаний.  $\tau_{рез}$  – время резания одним зубом фрезы.

Экспериментальные исследования проводили при следующих условиях:

а) **Оборудование** – универсально фрезерный станок модели FWD-32j.

б) **Инструмент** – концевая однозубая фреза  $\varnothing 60$  мм, режущий зуб P6M5 (HRC 63-64). Геометрия режущего зуба:  $\gamma=0^\circ$ ;  $\alpha=10^\circ$ ,  $\omega=-45^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  (см. рис.2).

в) **Образец из обрабатываемого материала** размером 50x20x4 (Ст 3КП ГОСТ 380-2005).

г) **Упругая система тонкостенной детали.** Пластина с размерами вылета  $L=80$  мм,  $B=60$  мм,  $h=8$  мм. Материал Сталь 65Г (HRC 60).

д) **Режимы фрезерования:**

- скорость вращения шпинделя  $n=280$  об/мин (условие образования интенсивных автоколебаний);

- продольная подача стола  $s_{\text{мин}} = 90$  мм/об;

- подача на зуб  $s_z = 0,31$  мм/зуб;

- ширина среза  $b = 4$  мм;

- глубина фрезерования (припуск)  $t = 0,5$  мм;

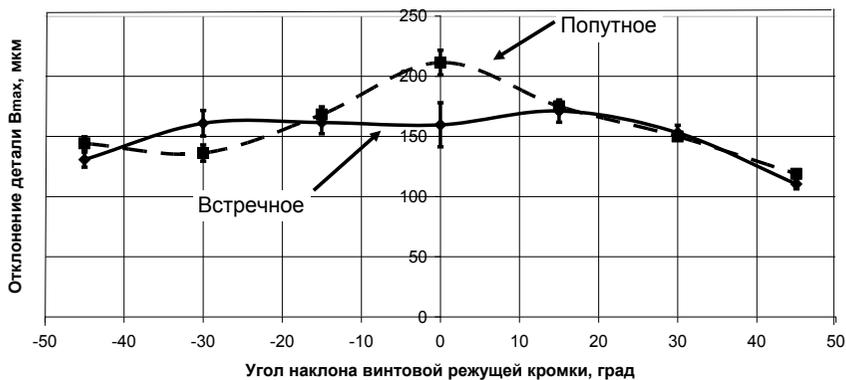
- направление подачи – встречное и попутное;

- условие резания – свободное косоугольное.

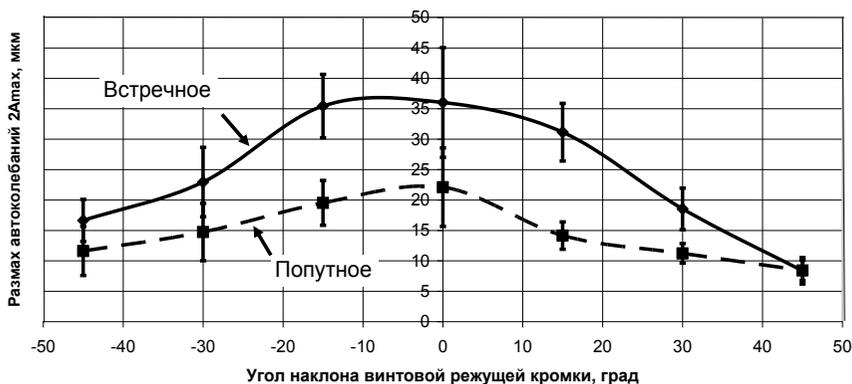
Результаты измерения величины максимального отжатия  $V_{\text{max}}$  и максимального размаха колебаний –  $A_{\text{max}}$  тонкостенной детали в зависимости от изменения угла наклона винтовой режущей кромки -  $\omega$  и направления подачи, приведены на рис 4.

При  $\omega = 0$ , когда режущая кромка является прямой, расположенной по образующей цилиндрической поверхности, была определена скорость вращения фрезы, при которой наблюдали максимальные регенеративные автоколебания. Это скорость соответствовала значению  $n=280$  об/мин. Дальнейшие исследования по выявлению влияния угла наклона винтовой режущей кромки -  $\omega$  на уровень вибраций были проведены на этой скорости. Изменение угла -  $\omega$  в положительном (правом) и отрицательном (левом) направлении изменяет величину максимального отклонения детали при вынужденном колебании  $V_{\text{max}}$  и максимального размаха автоколебаний  $2A_{\text{max}}$  симметрично, относительно их значений, полученных при  $\omega = 0$ . Общеизвестное условие большего значения сил, отклоняющих деталь при попутном фрезеровании [1] по сравнению со встречным при  $\omega=0$ , изменяется с увеличением угла наклона. При  $\omega$  больше  $15^\circ$  разница в силах отжима (т.е. в величине отклонения детали -  $V_{\text{max}}$ ) для обоих направлений подачи становится статистически незначимой. Однако, по абсолютной величине, с увеличением угла наклона  $\omega$  значение максимального отклонения детали

снижается. Для попутного фрезерования в 1,5-1,75 раза, для встречного в 1,3-1,45 раза.



а)



б)

Рисунок 4 – Влияние угла наклона винтовой режущей кромки на величину вынужденных  $V_{max}$  (а) и автоколебаний  $2A_{max}$  (б) тонкостенной детали

Изменение угла наклона -  $\omega$  влияет на величину размаха автоколебаний значительно больше. Для встречного фрезерования снижение автоколебаний при увеличении угла наклона  $\omega$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  достигает значений более 3,5 раз, для попутного до 2,5 раз соответственно. В условиях максимальных автоколебаний ( $n=280$  об/мин) при попутном фрезеровании уровень вибраций значительно меньше, чем при встречном. Однако, с увеличением  $\omega$  до  $\pm 45^\circ$  это различие снижается и становится статистически незначимым.

**Выводы:**

1. Результаты исследований показывают, что изменением углов наклона винтовой режущей кромки можно существенно улучшать виброхарактеристики процесса концевом цилиндрического фрезерования тонкостенных деталей, так:

- С увеличением угла наклона винтовой режущей кромки  $\omega$  выше  $15^\circ$  уровень отклонения тонкостенной детали –  $V_{\max}$  для встречного и попутного становится статистически незначимыми и снижается по сравнению с отклонениями при  $\omega=0$ .

- Уровень регенеративных автоколебаний для встречного фрезерования до 2-х раз выше, чем для попутного. С увеличением угла наклона  $\omega$  величина размаха уменьшается для обоих направлений подачи и только при больших углах наклона  $\omega \pm 45^\circ$  это различие становится статистически незначимым.

- Направление наклона винтовой режущей кромки правое или левое в равной степени изменяет величины вынужденных колебаний и автоколебаний для обоих направлений подачи.

2. Получено экспериментальное подтверждение эффективности применения разработанной методики оценки условий возбуждения вынужденных колебаний и автоколебаний при концевом фрезеровании тонкостенных деталей инструментом с изменяемыми углами наклона винтовой режущей кромки. Это может быть надежной методической базой для разработки ковых конструкций концевых фрез повышенной вибростойкости.

**Список использованных источников:** 1. *Логоминов В.А.* Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. ... канд. техн. наук.: 05.03.01: защищена 21.02.2013; утв. 25.04.2013 / *Логоминов Виктор Алексеевич.* – Запорожье, 2013. – 226 с. 2. *Внуков, Ю.Н.* Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании / *Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин* // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 32-37. 3. *Introduction to Signal Processing [Электронный ресурс] / Sophocles J. Orfanidis.* – Rutgers University, 2010. – 795 p. –Режим доступа к книге: [www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp](http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp).

**Bibliography (transliterated):** 1. *Logominov V.A.* Formirovanie sherohovatosti obrabotannoy poverhnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennykh jelementov detalej: dis. ... kand. tehn. nauk.: 05.03.01: zashchishhena 21.02.2013; utv. 25.04.2013 / *Logominov Viktor Alekseevich.* – Zaporozh'e, 2013. – 226 s. 2. *Vnukov, Ju.N.* Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkikh detalej pri koncevom frezerovanii / *Ju.N. Vnukov, V.A. Logominov, P.A. Kamorkin* // *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhd. nauchn. tehn. sb.* – Har'kov: NTU «HPI», 2011. – Vyp. 80. – S. 32-37. 3. *Introduction to Signal Processing [Elektronnyj resurs] / Sophocles J. Orfanidis.* – Rutgers University, 2010. – 795 r. –Rezhim dostupa k knige: [www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp](http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp).

*Поступила в редколлегию 23.04.2014*