

УДК 621.914.2

Канд. техн. наук С. И. Дядя<sup>1</sup>, Е. Б. Козлова<sup>1</sup>, канд. техн. наук Э. В. Кондратюк<sup>2</sup>,  
В. А. Кришталь<sup>2</sup>, А. Е. Зубарев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет, <sup>2</sup>ГП «Ивченко-Прогресс», <sup>3</sup>АО «Мотор Сич»;  
г. Запорожье

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ

*Описаны и систематизированы, полученные экспериментально пять скоростных зон с различными видами колебаний тонкостенного элемента детали. Для каждой скоростной зоны получено определяющее соотношение, позволяющее прогнозировать виды возникающих при фрезеровании колебаний.*

**Ключевые слова:** тонкостенная деталь, скоростная зона, время резания, время холостого хода, автоколебания.

Фрезерование концевыми фрезами деталей различных конструкций из различных видов материалов выполняется при режимах резания, которые, как правило, для тонкостенных элементов деталей, подбираются экспериментально с учетом уровня возникающих колебаний и их влияния на производительность, стойкость инструмента, точность размера и качество поверхности. Поэтому актуальным является получение до начала обработки информации о том, в каких условиях будет проходить фрезерование.

Тонкостенные элементы имеют существенно отличающиеся от остальной части детали статические (жесткость) и динамические (частота и амплитуда собственных колебаний, декремент затухания) характеристики. Примером таких деталей могут служить лопатки моноколеса «блиск» ГТД, фрезеруемые из цельного материала (рис. 1).



Рис. 1. Лопатки моноколеса «блиск»

Целью данной статьи является систематизация колебаний, возникающих при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей, по их воздействию на формирование качества обработанной поверхности.

При финишном фрезеровании тонкостенных элементов деталей концевыми, сферическими и тороидальными фрезами в зоне резания всегда работает один зуб. Фрезерование сопровождается вынужденными колебаниями от врезания до выхода зуба фрезы из зоны резания, вынужденными и автоколебаниями, а также свободными колебаниями с собственной частотой после выхода инструмента из зоны резания. В связи с малыми радиальными и осевыми глубинами резания до врезания следующего зуба всегда есть холостой ход. Кроме того, характерной особенностью концевое фрезерование во всем диапазоне частот вращения шпинделя является постоянное значение отношения времени резания одним зубом фрезы ( $t_{рез}$ ) к времени холостого хода ( $t_{х.х}$ ), т. е.

можно принять, что  $\frac{t_{рез}}{t_{х.х}} = const$ .

На основе экспериментальных исследований и перечисленных выше особенностей в зависимости от режимов обработки сформированы пять скоростных зон с различными сочетаниями колебаний.

**В первой скоростной зоне** действуют только вынужденные колебания (рис. 2). Врезание инструмента происходит в неколеблющуюся деталь. После выхода инструмента из зоны резания при холостом ходе свободных колебаний детали нет.

**Во второй скоростной зоне** характерными являются вынужденные колебания детали, которые формируются при врезании инструмента и собственные затухающие колебания во время холостого хода (рис. 3). Причем при входе в припуск очередного зуба фрезы, собственные колебания детали полностью затухают.

Для третьей скоростной зоны характерны вынужденные колебания, на которые накладываются автоколебания при резании, и собственные затухающие колебания во время холостого хода инструмента (рис. 4).

В четвертой скоростной зоне действуют вынужденные колебания и собственные затухающие колебания во время холостого хода инструмента (рис. 5). Автоколебания в четвертой зоне не успевают проявиться, потому что время резания одним зубом фрезы меньше, чем частота автоколебаний. В этой зоне инструмент всегда врезается в колеблющуюся деталь.

В пятой скоростной зоне действуют только вынужденные колебания (рис. 6). Инструмент всегда врезается в колеблющуюся деталь.

Каждая скоростная зона характеризуется своим механизмом формирования качества обработанной поверхности. Качество поверхности в первых двух зонах зависит от диаметра инструмента и подачи на зуб ( $S_z$ ). По этим данным можно предварительно определить погрешность обработки. Кроме этого фрезерование в этих зонах встречается редко из-за низкой производительности. Черновое и чистовое фрезерование на высокоскоростных станках, как правило, охватывает с третьей по пятую скоростные зоны. Поэтому на этапе проектирования для прогнозирования ожидаемого качества поверхности необходимо определить скоростную зону.

В качестве определяющего критерия были сформулированы соотношения между временем

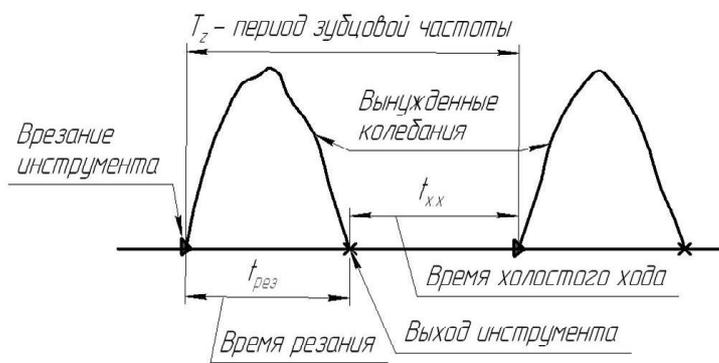


Рис. 2. Колебания тонкостенного элемента детали в первой скоростной зоне

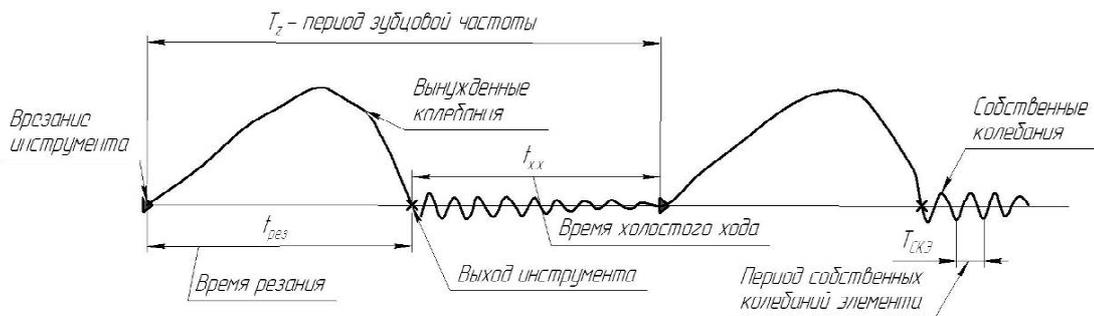


Рис. 3. Колебания тонкостенного элемента детали во второй скоростной зоне

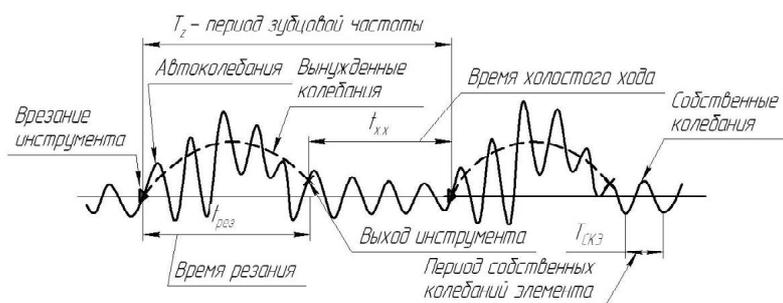


Рис. 4. Колебания тонкостенного элемента детали в третьей скоростной зоне

резания ( $t_{рез}$ ), временем холостого хода ( $t_{х.х}$ ) и периодом свободных колебаний элемента ( $T_{СКЭ}$ ).

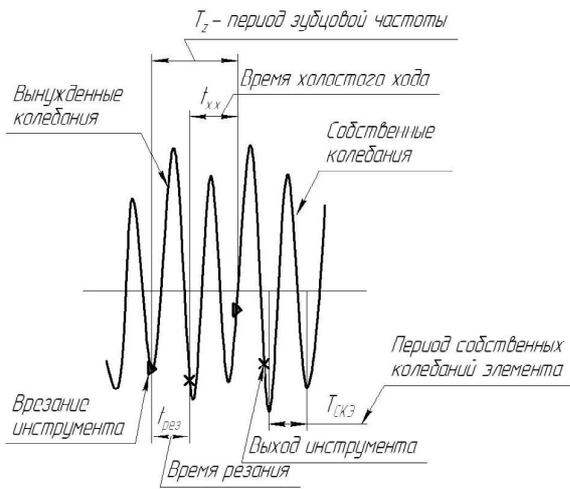


Рис. 5. Колебания тонкостенного элемента детали в четвертой скоростной зоне

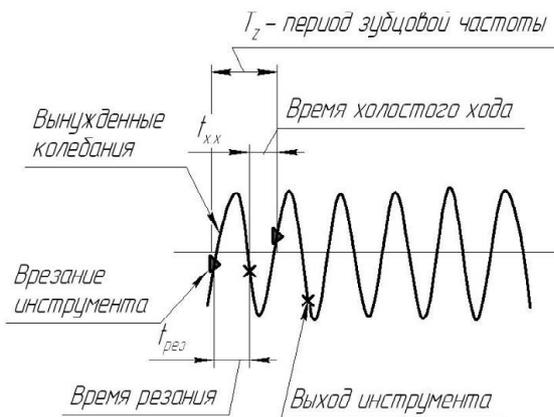


Рис. 6. Колебания тонкостенного элемента детали в пятой скоростной зоне

Исследования, проведенные на экспериментальном оборудовании [1] показали, что возникающие в третьей скоростной зоне автоколебания оказывают существенное влияние на качество обработанной поверхности при соотношениях времени резания к периоду свободных колебаний элемента от 1 до 7

$$\left( 1 < \frac{t_{рез}}{T_{СКЭ}} < 7 \right).$$

Третья скоростная зона сменяется четвертой, когда автоколебания не успевают развиться из-за того, что время резания меньше периода свободных колебаний. После выхода зуба из зоны резания при холостом ходе есть свободные колебания. Четвертая зона определяется по соотношениям

$$\frac{t_{рез}}{T_{СКЭ}} \leq 1 \text{ и } \frac{t_{х.х}}{T_{СКЭ}} \geq 1.$$

В пятой скоростной зоне собственных колебаний нет, поэтому ее можно определить по соотношению  $\frac{t_{х.х}}{T_{СКЭ}} < 1$ . В этой зоне частота колеба-

ний детали близка к зубцовой частоте  $f_z = \frac{nz}{60}$ .

При концевом фрезеровании многолезвийным инструментом возможна ситуация, когда время резания и холостого хода равны ( $t_{рез} = t_{х.х}$ ). Тогда четвертая зона вырождается и после третьей зоны начинается пятая.

Следует отметить, что диапазоны частот вращения шпинделя, в которых наблюдаются различные виды колебаний, зависят от диаметра инструмента, числа зубьев ( $z$ ), угла наклона режущей кромки зуба фрезы ( $\omega$ ), осевой ( $a_p$ ) и радиальной ( $a_e$ ) глубин резания, а также жесткости тонкостенного элемента. Первые пять параметров влияют на время резания одним зубом ( $t_{рез}$ ) и время холостого хода ( $t_{х.х}$ ), а шестой — на период собственных колебаний ( $T_{СКЭ}$ ).

Так, например, при фрезеровании фрезой  $\varnothing 30$  мм, с режимами: подача на зуб  $S_z = 0,1$  мм, осевая глубина  $a_p = 4$  мм, радиальная глубина  $a_e = 0,5$  мм, третья скоростная зона охватывает частоты вращения шпинделя от  $n = 224$  об/мин до  $n = 710$  об/мин. При фрезеровании образца с теми же характеристиками на тех же режимах, но фрезой  $\varnothing 55$  мм третья зона охватывает частоты вращения шпинделя от  $n = 112$  об/мин до  $n = 560$  об/мин, т. е. с увеличением диаметра фрезы скоростные зоны смещаются в сторону более низких частот вращения шпинделя.

### Выводы

1. Колебания, возникающие при концевом фрезеровании тонкостенных элементов детали, разделяются на пять скоростных зон, каждая из которых характеризуется различными видами колебаний.

2. При концевом фрезеровании наиболее характерными является обработка в третьей, четвертой и пятой скоростных зонах. Их разделение определяется соотношениями: для третьей скоростной зоны  $1 < \frac{t_{рез}}{T_{СКЭ}} < 7$ ; для четвертой —

$$\frac{t_{рез}}{T_{СКЭ}} \leq 1, \frac{t_{х.х}}{T_{СКЭ}} \geq 1; \text{ для пятой — } \frac{t_{х.х}}{T_{СКЭ}} < 1.$$

3. Диапазоны частот вращения шпинделя, в которых наблюдаются различные скоростные зоны, зависят от диаметра инструмента, числа зубьев ( $z$ ), угла наклона режущей кромки зуба фрезы ( $\omega$ ), осевой ( $a_p$ ) и радиальной ( $a_e$ ) глубин резания, а также жесткости тонкостенного элемента детали.

**Список літератури**

1. Патент UA 94974 МПК (2006) G01N11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей. Логомінов

Віктор Олексійович, Гермашев Антон Ігоревич, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна. — u201405981 ; заявл. 02.06.2014 ; опубл. 10.12.2014.

*Поступила в редакцію 20.01.2016*

**Дядя С.І., Козлова О.Б., Кондратюк Е.В., Кришталь В.А., Зубарев А.Є. Систематизація коливань при кінцевому фрезеруванні тонкостінних елементів деталей**

*Описані і систематизовані, отримані експериментально п'ять швидкісних зон з різними видами коливань тонкостінного елемента деталі. Для кожної швидкісної зони отримано визначальне співвідношення, що дозволяє прогнозувати види коливань, що виникають при фрезеруванні.*

**Ключові слова:** тонкостінна деталь, швидкісна зона, час різання, час холостого ходу, автоколивання.

**Diadia S., Kozlova Ye., Kondratjuk E., Krishtal V., Zubarev A.**

*Systematization of vibrations at end-cappingmilling of the thin-walled elements of details. Described and systematized, got five speed zones are experimental with the different types of vibrations of the thin-walled element of detail. For every speed zone qualificatory correlation allowing to forecast the types of arising up at milling vibrations is got.*

**Key words:** thin-walled detail, speed zone, time-in-cut, time of idling, auto-oscillation.