

# НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

## ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОЖНО-ПРОФИЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

### Введение

Taylor – автор первого крупного труда по металлообработке «Искусство резания металлов» [1] так отозвался о проблеме устранения колебаний: «Вопрос относительно возникновения дрожания резцов представляется самым тонким из всех, с которым приходится иметь дело рабочему». Наиболее остро эта проблема возникает в случаях необходимости увеличения продуктивности обработки, при резании труднообрабатываемых сталей и сплавов, а также при недостаточной жесткости одной из составляющих системы станок–инструмент–приспособление–заготовка (СПИЗ).

Вибрации при резании металлов долгое время считались вынужденными колебаниями [2]. Впервые опроверг такую трактовку Дроздов Н. А. в 1937 г. Он опубликовал работу [3], в которой показал, что частота вибраций неизменна в широком диапазоне скоростей резания. На основании этого он пришел к выводу, что вибрации, порождаемые процессом резания, следует считать автоколебаниями.

Автоколебания принято разделять на первичные, возбуждаемые при первом проходе инструмента, и вторичные, возникающие при резании по волнистому следу.

Первичное возбуждение автоколебаний обусловлено воздействием совокупности нескольких взаимосвязанных причин, при этом одна или две из них доминируют в зависимости от условий процесса резания. Причины первичных автоколебаний рассмотрены в работах [4–12 и др.].

Для процессов фрезерования отдельно выделяют следующие причины: периодические импульсные нагрузки в технологической системе (ТС) при входе и выходе зубьев из заготовки и изменение силы резания по величине в пределах длины контакта зуба фрезы с заготовкой [13].

Вторичные причины возбуждения автоколебаний вызваны волнистостью на поверхности резания, оставшейся при предыдущем проходе инструмента. При этом, если существует сдвиг фазы колебаний, наблюдается периодически изменяющаяся толщина стружки, и, соответственно, сила резания. Данные колебания называют регенеративными автоколебаниями (в англоязычной литературе – «regenerative chatter»).

В 1937 г. Дроздов Н.А. [3] впервые показал важную роль следа на поверхности заготовки в поддержании автоколебаний. Исследования 40...50-х годов, проведенные Кашириным А. И. [14], Соколовским А. П. [15], Амосовым И. С. [16], Ильницким И. И. [13], Кучмой Л. К. [8] также показали большое значение регенерации для поддержания автоколебаний. Амосов И. С. [16], Ильницкий И. И. [13], Решетов Д. Н. и Левина З. М. [18]. писали, что вторичное возбуждение следа обеспечивает 85 % энергии возбуждения автоколебаний.

В середине 50-х годов исследования Кудинова В. А. [7], Tlusty J. [19] и др., Tobias S. A., Fishwick W. A. [20] позволили использовать понимание физической сущности регенеративного возбуждения автоколебаний при создании теории для определения стабильных условий обработки.

Основные принципы регенеративной теории устойчивости (в англоязычной литературе «regenerative theory») были разработаны Tobias S. A. [22] и Tlusty J. [23], которые изучали взаимодействие динамики структуры системы станка и динамики процесса резания. Они определили явления регенерации и координатную связь как основной механизм автоколебаний при обработке. Merritt H. E. [24] предложил использование явления регенерации и законов укладки волн на поверхности резания, возникших вследствие автоколебаний, для определения устойчивости ортогонального точения. Данный подход был в дальнейшем развит большим количеством исследователей и послужил источником для разработки основ расчета так называемых лепестковых диаграмм устойчивости (в англоязычной литературе «stability lobe diagram»), которые в настоящее время широко используются для определения максимально возможной осевой глубины резания (границы устойчивости) при наибольшей частоте вращения шпинделя. Данный подход был разработан для точения, хотя автоколебания возникают при большинстве процессов металлообработки. С развитием лепестковых диаграмм они стали использоваться и для других операций, в том числе и для фрезерования. Tlusty J. [25] и Tlusty J., Ismail F. [26] провели детальный анализ устойчивости фрезерования, основанной на теории регенеративных автоколебаний. В дальнейшем в алгоритме расчета устойчивости при фрезеровании был учтен тот факт, что данный вид обработки имеет прерывистый характер приложения силы резания, связанный со входом и выходом зубьев [27–29].

Особенным случаем при фрезеровании является обработка с малыми радиальными и осевыми глубинами, характерная для случая фрезерования тонкостенных деталей. При этом, как отметил Davies M. A. [30] (1998 г.), допущения традиционной регенеративной теории становятся неверными, так как при условии периодической потери кон-

такта между инструментом и деталью наблюдается удвоение количества лепестков в диаграмме устойчивости, по сравнению с классической теорией, где максимальная устойчивость обработки достигается при целых фракциях частот собственных колебаний наименее жесткой моды системы.

В отличие от операций точения, которые характеризуются одной частотой автоколебаний в соответствии с бифуркацией Хопфа автономных систем, операции фрезерования характеризуются параметрическими колебаниями и представляют несколько частот вибраций [31] (зубцовая частота имеет бесконечно много высших гармоник). В связи с этим происходит появление дополнительных зон устойчивости, связанных с удвоением периода или бифуркацией флипа [32]. Изучению данного явления посвящены работы [33, 34 и др.]. Для расчета стабильности при таких условиях обработки наиболее точными считаются многочастотный метод (Budak E., Altintas Y. [36] и Merdol S., Altintas Y. [34]) и метод полудискретизации [37]. Методы имеют хорошую согласованность и дают близкие результаты [34].

Таким образом, как зарубежные, так и отечественные литературные источники свидетельствуют о том, что причиной возникновения вибраций при металлообработке являются автоколебания. Эти выводы сформированы на основании большого количества исследований и на протяжении длительного временного интервала. Общая концепция была сформулирована много десятилетий назад, однако, является общепринятой и актуальной и по сей день.

За последние несколько десятилетий процессы металлообработки претерпели значительное изменение, вызванное появлением и последующим бурным развитием станков с ЧПУ с большим количеством степеней свободы рабочих органов, потребностью в изготовлении легких, прочных, монолитных деталей сложной формы. Стоит отметить, что эволюция металлообработки сей час находится в активной фазе. Производство нуждается в изготовлении узлов большего размера, с меньшим количеством сборочных единиц, с более сложной геометрической формой поверхностей и из более прочных, а значит – и труднообрабатываемых, материалов.

Одним из ключевых моментов в истории станкостроения является появление высокоскоростных шпинделей, которые изменили цели и задачи исследования процессов резания, а также концепцию проектирования технологических операций в целом. Так, если ранее стремились к повышению производительности (1) путем увеличения площади сечения стружки ( $a_p$  и  $a_e$ ), то основополагающей задачей на данный момент является покорение новых, более высоких скоростей резания, что в свою очередь позволяет увеличить минутную подачу ( $S_{мин}$ ) и, следовательно, производительность:

$$Q = S_{мин} a_e a_p, \quad (1)$$

где  $a_p$  – осевая глубина, мм;  $a_e$  – радиальная глубина, мм;  $S_{мин}$  – минутная подача, мм/мин.

Одной из наиболее распространенных технологических операций является сферическое или торовое концевое фрезерование, которое позволяет изготавливать как сложно-профильные детали, так и обеспечивать формообразование поверхности, присущее другим видам фрезерной обработки. Снятие припуска при этом осуществляется радиусной или переходной частью режущей кромкой. Особенностью данного вида обработки является низкая осевая глубина, которая лимитирована геометрической формой детали. Реализация сложно-профильного фрезерования стала возможной именно благодаря современным станкам с ЧПУ, а скоростные шпиндели обеспечили его высокую популярность, придав этому процессу конкурентоспособную производительность.

Целью данной статьи является рассмотрение процесса концевого фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей, выявление отличий данного процесса обработки от классического концевого фрезерования, определение факторов, влияющих на качество обработки, а также разработка методики исследования, основанной на учете особенностей такого вида фрезерования.

### **Сравнение классического и сложно-профильного фрезерования тонкостенных элементов деталей**

Наиболее востребованы тонкостенные детали в авиакосмической и автомобильной промышленности. Как правило, такие детали работают при высоких динамических и центробежных нагрузках и выполняют задачи по перераспределению жидкости или газа. Примером тонкостенных компонентов являются лопатки осевого или центробежного колеса ГТД, лопатки компрессора ГТД, крыльчатка турбины и т.д. В большинстве случаев их изготовление осуществляется при одновременной пяти осевой обработке сферическими фрезами.

Как уже упоминалось выше, осевая глубина при фрезеровании сложно-профильных поверхностей ограничена ее геометрическими характеристиками. В случае обработки тонкостенных элементов к этому ограничению добавляется и относительно малые радиальные глубины. Таким образом, процесс обработки осуществляется с малым радиальным и осевым врезанием инструмента (рис. 1), что приводит к уменьшению дуги контакта фрезы и заготовки до значений меньших, чем шаг зубьев. Вследствие этого резание приобретает прерывистый характер (в англоязычной литературе – «interrupted machining»). То есть снятие припуска каждым зубом фрезы чередуется со свободным движением детали и инструмента. Процесс свободного движения предложено называть – холостым ходом.

Ввиду описанных выше факторов при фрезеровании сложно-профильных тонкостенных деталей сила резания существует периодически (рис. 2). Кроме существования холостого хода такое явление накладывает дополнительные

особенности. Несмотря на то, что при классическом фрезеровании сила резания ( $F$ ) принимает бoльшие значения, что связано с бoльшим сечением стружки, при фрезеровании тонкостенных деталей величина изменения силы ( $\Delta F$ ) выше. Таким образом, импульсные нагрузки на тонкостенную деталь, а соответственно и значение динамической составляющей вынуждающей силы больше при прерывистом резании. Кроме того, обработка тонкостенных деталей не допускает возможности достижения безвибрационного резания, когда в зацеплении с припуском находится одинаковая длина активной режущей кромки [38, 39].

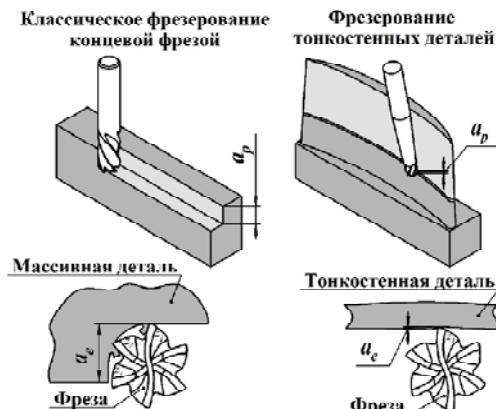


Рис. 1. Общая концепция радиальных и осевых глубин при классическом и сложно-профильном концевом фрезеровании тонкостенных деталей

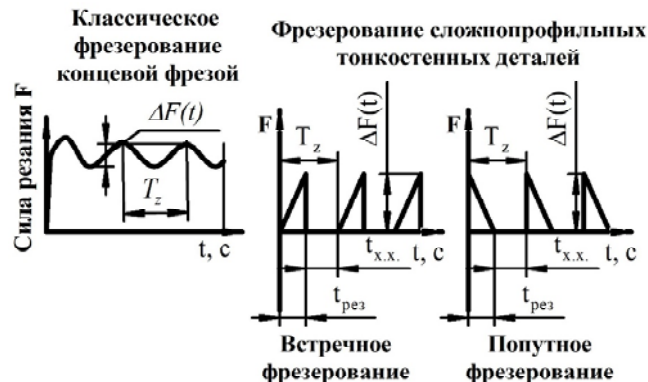


Рис. 2. Изменение во времени силы резания при классическом и сложно-профильном концевом фрезеровании тонкостенных деталей

В 1978 году Tlustý J. [40] была предложена замкнутая автоколебательная система для процесса резания, детали и инструмента (рис. 3), которая лежит в основе расчета «границы устойчивости обработки» согласно «регенеративной теории». Действительно, для случая точения или классического фрезерования колебательная система детали и/или инструмента находится в постоянном взаимодействии с процессом резания, что и обеспечивает автоколебательный процесс.

Для случая фрезерования тонкостенных деталей описанная выше схема не может быть применима, так как она имеет место исключительно в момент резания, который периодически сменяется свободным движением детали. Следовательно, система СПИЗ в зависимости от углового положения инструмента является или замкнутой, или разомкнутой.

Стоит отметить, что формирование установившегося автоколебательного процесса при резании требует определенного времени настройки системы. В случае операции точения или классического фрезерования – это время является незначительным, по сравнению со временем обработки. При рассмотрении же фрезерования тонкостенных деталей, где малая длина контакта инструмента с деталью сочетается с высокими скоростями вращения фрезы и всегда процесс резания является прерывистым, существование установившегося автоколебательного процесса требует проверки, которая будет представлена в четвертой части данной работы.

Таким образом, фрезерования сложно-профильных тонкостенных поверхностей имеет существенные отличия от классического фрезерования, так как представляет собой прерывистый процесс обработки.

**Стенд для изучения процесса фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей**

Для изучения процесса фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей предложен стенд, изображенный на рис. 4. Детальная информация о конструкции стенда изложена в работах [41, 42]. Захватное устройство представляет собой массивное основание, которое устанавливается на столе фрезерного станка через электроизоляцию, и служит для надежного крепления упругого элемента (тонкостенной пластины). На пластине жестко закрепля-

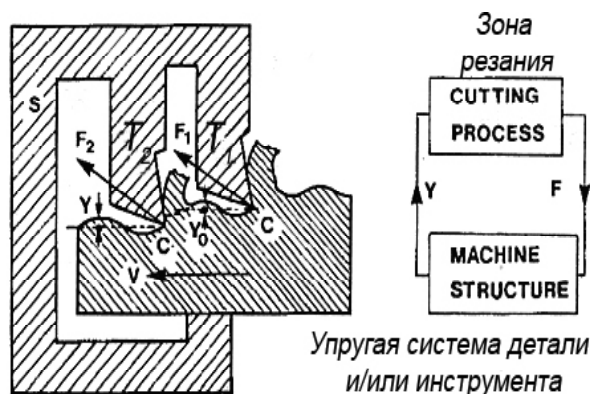


Рис. 3. Процесс резания, система станка и инструмента в замкнутой автоколебательной системе, предложенные Tlustý J.

ется обрабатываемый образец. При фрезеровании, в результате действия силы отжима со стороны фрезы, происходит перемещение образца, величину которого измеряют датчиком перемещения по изменению зазора –  $\Delta$ .

Конструкция стенда была доработана системой измерения условий контактирования инструмента с деталью [43, 44]. К измерительному стенду подводится низковольтный источник питания. При контакте зуба фрезы с обрабатываемым образцом электрический сигнал передается через подвижный токосъемник на АЦП. Запись сигнала с токосъемника и сигнала перемещения образца осуществляется одновременно, что дает возможность их высокоточного совмещения (рис. 2).

Система измерения наличия контакта между фрезой и инструментом является принципиальным элементом экспериментального стенда для изучения процесса прерывистого резания, так как позволяет разделять осциллограмму колебания детали на процесс резания и холостой ход.

Анализ колебания детали предложено производить в масштабе одного цикла фрезерования (рис. 5). Время одного цикла состоит из времени резания –  $\tau_{рез}$ , в течение которого происходит удаление припуска и времени холостого хода  $\tau_{х.х.}$ , в течение которого, очередной зуб подходит к точке врезания в деталь. Во время резания –  $\tau_{рез}$  деталь отклоняется под действием силы отжима –  $P_{ом}$ , а во время холостого хода деталь совершает свободные затухающие колебания. Для данных условий обработки можно наблюдать присутствие автоколебаний в процессе резания. Это связано с относительно низкой скоростью резания, что обеспечивает возможность системы совершить несколько автоколебательных циклов за время срезания припуска. Хотя столь низкая скорость резания скорее является искусственной для обработки тонкостенных деталей, она позволяет исследовать явление автоколебаний при прерывистом резании. Стоит отметить, что при увеличении частоты вращения шпинделя количество регенеративных волн на поверхности резания уменьшается до их полного исчезновения. В связи с малой дугой контакта инструмента с деталью высокоскоростное фрезерование тонкостенных деталей происходит в условиях, когда система не успевает совершить даже одно автоколебание за время резания.

Статистические данные экспериментального теста формируются накоплением и усреднением информации о каждом цикле фрезерования в течении всей обработки. Данная процедура осуществляется с помощью разработанных авторами программных продуктов.



Рис. 4. Экспериментальный стенд для изучения высокоскоростного фрезерования тонкостенных деталей

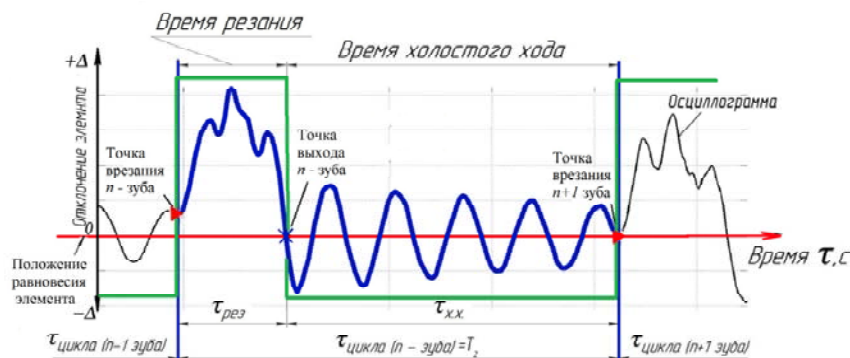


Рис. 5. Фрагмент осциллограммы колебания детали ( $n = 710$  об/мин,  $h = 6$  мм,  $D_{фр} = 20$  мм,  $z = 3$ , ЧСК  $f = 560$  Гц, жесткость  $j = 992410^3$  Н/м, попутное фрезерование)

### Автоколебания при фрезеровании сложно-профильных тонкостенных деталей

Как упоминалось выше точение или классическое фрезерование сопровождается установившимся автоколебательным процессом. В зависимости от модальных характеристик элементов системы СПИЗ, а также режимов резания, уровень автоколебаний может принимать большие или меньшие значения, однако автоколебания всегда имеют место. В случае прерывистого резания автоколебательный процесс требует дополнительного рассмотрения.

Для этого была проведена серия экспериментальных тестов (условия проведения эксперимента представлены в табл. 1), в которых определяли частоту автоколебаний детали.

Таблиця 1 – Умовия проведення експериментальних дослідвань

Характеристики пластины	ЧСК, Гц	Коеффициент демпфирования, $\xi$	Жесткость $j$ , Н/м	Частота вращения шпинделя $n$ , об/мин	Режимы резания	Характеристики инструмента
$L = 80$ мм, $B = 60$ мм, $h = 4$ мм, сталь 65Г (HRC 60)	264	0,03	$228 \times 10^3$	от 224 до 1800	$S_z = 0,05$ мм/зуб, $a_p = 2$ мм, $a_e = 0,5$ мм	$D_{фр} = 20$ мм, $z = 3, \gamma = 6^\circ$ ; $\alpha = 11^\circ$ ; $\lambda^\circ = -10^\circ$ ; JC8050

Методика измерения показана на рис. 6 и заключается в определении периода и вычислении частоты автоколебаний для каждой волны, определении средней частоты для каждого процесса срезания припуска и для всей обработки в целом. Таким образом, данная методика позволяет определить, как изменяется частота автоколебаний в процессе срезания припуска, так и для всей обработки, а также при изменении условий обработки. Такой подход является более полным и достоверным источником информации для данных целей, нежели использование быстрого преобразования Фурье. В качестве проверки проводится дополнительное измерение частоты собственных колебаний (ЧСК) во время свободного движения детали. Методика реализуется с помощью разработанных авторами программных продуктов.

Результаты исследования (рис. 7) показывают, что с увеличением частоты вращения шпинделя частота автоколебаний существенно уменьшается (до 2-х раз). Кроме этого, отмечено, что частота автоколебаний изменяется в процессе обработки и даже при срезании припуска (до 30 %). Также изменение частоты автоколебаний наблюдали при изменении направления подачи. Достоверность измерения подтверждается неизменной ЧСК детали при каждом экспериментальном тесте. Такие данные свидетельствуют о том, что автоколебательный процесс находится в состоянии поднастройки, и столь малого времени резания недостаточно для формирования установившихся автоколебаний. В первую очередь, это накладывает существенные трудности для аналитического расчёта данного параметра, а во-вторых показывает невозможность применения закономерностей, установленных при классическом фрезеровании, для случая прерывистого резания.

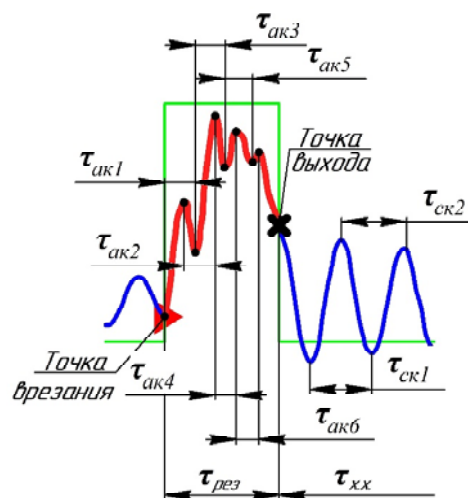


Рис. 6. Методика измерения автоколебаний при прерывистом резании

Вырождение регенеративных волн с поверхности резания наблюдали при частоте вращения шпинделя  $n = 1800$  об/мин для встречного фрезерования и при  $n = 1400$  об/мин для попутного.

Следует отметить, что момент вырождения волн с поверхности резания зависит от большого количества факторов, среди которых наиболее весомыми являются: ЧСК инструмента и детали, характеристики системы СПИД, режимы резания и геометрия инструмент.

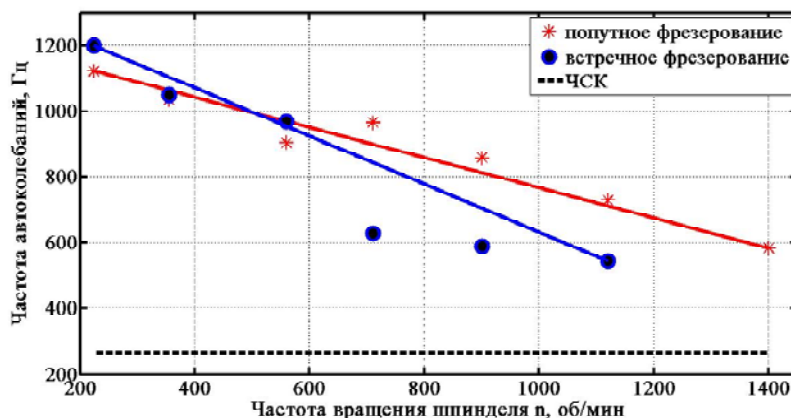


Рис. 7. Экспериментальное определение частоты автоколебаний

ЧСК лопаток колеблется от 200 Гц для осевых моноколес ГТД большого диаметра до 2500 Гц для центробежных колес малого диаметра. Диапазон ЧСК других сложно-профильных тонкостенных деталей авиационного ГТД также укладывается в этот диапазон. Чем меньше габаритные размеры изготавливаемого изделия, тем меньше его ЧСК, а соответственно и больше волн на поверхности резания может уложиться. Однако, при этом, меньшие детали изготавливаются инструментом малого диаметра, что сокращает длину поверхности резания, а, следовательно, и количество регенеративных волн. В связи с этим нахождение частоты вращения шпинделя, при которой наступает вырождение автоколебаний для каждой конкретной детали и ее условий обработки должно осуществляться индивидуально. Алгоритм, позволяющий провести такой анализ, будет представлен в дальнейших работах авторов.

Однако, учитывая, что финишная обработка сложно-профильных тонкостенных деталей осуществляется с частотой вращения шпинделя свыше 12000 об/мин, можно утверждать, что резание происходит в условиях, когда на поверхности резания нет ни одной волны. Отсутствует ли автоколебательный процесс или на поверхности резания остается малая фракция волны с точностью утверждать, основываясь на имеющихся у авторов экспериментальных данных, нельзя, но можно заявить, что если незначительная доля регенеративной волны и существует, то ее недостаточно для возбуждения автоколебаний, способных повлиять на качество обработки.

### Выводы

1. Фрезерование тонкостенных деталей со сложной геометрической формой поверхности является прерывистой обработкой, где резание происходит периодически, сменяясь свободным движением детали и инструмента. Такая особенность определяет иные закономерности течения процесса, нежели для классического фрезерования. Так, тонкостенное фрезерование происходит при высоких импульсных нагрузках, из-за чего существенно выше изменение величины вынуждающей силы.

2. Процесс организации и поддержания автоколебаний имеет свои особенности. В условиях прерывистого резания невозможно достигнуть установившихся автоколебаний. Также, в то время, когда при классическом фрезеровании или точении автоколебания существуют всегда, при фрезеровании тонкостенных деталей ситуация обстоит иначе.

3. Начиная с относительно небольших частот вращения шпинделя, на поверхности резания остается менее одной регенеративной волны, в то время как достигнуть такой ситуации при точении, на сегодняшний день не представляется возможным, а при фрезеровании достижимо только при использовании многозубого инструмента и высокоскоростной обработки.

4. При высоких скоростях, используемых при фрезеровании тонкостенных деталей, возбуждения автоколебаний не происходит. Таким образом, накопленная информация о природе возникновения и механизмах поддержания автоколебаний не может быть непосредственно применима для фрезерования тонкостенных деталей.

5. Из вышеизложенного следует заключение о том, что при высокоскоростном фрезеровании тонкостенных деталей сложной формы процесс происходит в условиях возбуждения упругой системы детали вынужденными колебаниями. Данная информация является источником для разработки подходов определения виброустойчивых условий обработки подобных деталей.

### Список литературы

1. Taylor F. W. On the art of cutting metals / F. W. Taylor. – New York : Published by the American society of mechanical engineers, 1907. – 248 p.
2. Рыжков Д. И. Вибрации при резании металлов и методы их устранения / Д. И. Рыжков. – М. : Машгиз, 1961. – 172 с.
3. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. – № 22. – С. 21–25.
4. Городецкий Ю. И. Анализ и синтез динамического качества фрезерных станков : дис. докт. техн. наук : 05.03.01 / Городецкий Юрий Исакович. – Горький, 1986.
5. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
6. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – М. : Машиностроение, 1978. – 199 с.
7. Кудинов В. А. Теория вибраций при резании (трении) / В. А. Кудинов // Передовая технология машиностроения: сб. научн. тр. – М. : АН СССР. – 1955. – С. 631–643.
8. Кучма Л. К. Вибрации при работе на фрезерных станках и методы их гашения / Л. К. Кучма. – М. : СССР, 1959. – 122 с.
9. Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1967. – 416 с.
10. Глустый И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Глустый. – М. : Машиностроение, 1956. – 234 с.
11. Эльясберг М. Е. Автоколебания металлорежущих станков / М. Е. Эльясберг. – П. : Издание ОКБС, 1993. – 180 с.
12. Tlusty J. Basic Nonlinearity in Machining Chatter / J. Tlusty, F. Ismail // Annals of the CIRP. – 1981. – Vol. 30. – P. 21–25.
13. Ильницкий И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И. И. Ильницкий. – Москва-Свердловск : Машгиз, 1958. – 145 с.
14. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании металлов / А. И. Каширин. – М. : Издательство АН СССР, 1944. – 132 с.
15. Соколовский А. П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А. П. Соколовский // Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов : сб. научн. тр. – М. : Машгиз, 1958. – С. 3–23.



16. Амосов И. С. Осциллографическое исследование вибраций при резании металлов / И. С. Амосов // Точность механической обработки и пути ее повышения : сб. науч. тр. – М.-Л. : Машгиз, 1951. – С. 45–50.
17. Dynamics of Metal Cutting Process / P. Albrecht // Trans. of ASME. Vol. 87. – 1965. – P. 429–441.
18. Решетов Д. Н. Возбуждение и демпфирование колебаний в станках / Д. Н. Решетов, З. М. Левина // Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов : сб. научн. тр. – М. : Машгиз, 1958. – С. 87–153.
19. Tlusty J. The Stability of Machine Tools Against Self-Excited Vibrations in Machining. / J. Tlusty, M. Polacek // ASME International Research in Production Engineering. – 1963. – P. 465–474.
20. Tobias S. A. The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions / S. A. Tobias, W. A. Fishwick // Trans. of ASME. – 1958. – Vol. 80. – P. 1079–1088.
21. Tlusty J. Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics Annals of the CIRP, Vol. 27, No. 2. – 1978. – P. 583–589.
22. Tobias S. A. Machine Tool Vibration / S. A. Tobias, Wiley, N.Y., 1965. – 352 p.
23. Koenigsberger I. Structures of Machine Tools / I. Koenigsberger, J. Tlusty, Pergamon Press. – 1971. – 519 p.
24. Merritt H. E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H. E. Merritt, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 87. – 1965. – P. 447–454.
25. Tlusty J. Dynamics of high-speed milling / J. Tlusty // Journal of Engineering for Industry 108. – 1986. – P. 59–67.
26. Tlusty J. Special aspects of chatter in milling / J. Tlusty, F. Ismail // Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design 105. – 1983. – P. 24–32.
27. Shridar R. A general formulation of the milling process equation / R. Shridar, R. E. Hohn, G. W. Long // Journal of Engineering for Industry 90. – 1968. – P. 317–324.
28. Altintas Y. A general mechanics and dynamics model for helical end mills / Y. Altintas, P. Lee, Annals of the CIRP 45(1). – 1996. – P. 59–64.
29. Smith S. An overview of modelling and simulation of the milling process / S. Smith, J. Tlusty // ASME Journal of Engineering for Industry 113. – 1991. – P. 169–175.
30. Davies M. A. The stability of low radial immersion milling / M. A. Davies, J. R. Pratt, B. Dutterer, T. J. Burns // CIRP Annals-Manufacturing Technology, CIRP Annals-Manufacturing Technology 49 (1). – 2000. – P. 37–40.
31. Insperger T. Semi-discretization for time-delay systems: stability and engineering applications / T. Insperger, G. Stépán // Springer Science & Business Media, Vol. 178. – 2011. – 174 p.
32. Insperger T. Vibration Frequencies in High-Speed Milling Processes or a Positive Answer to Davies, Pratt, Dutterer and Burns / T. Insperger, G. Stépán // Manuf. Sci. Eng 126(3). – 2004. – P. 481–487.
33. Davies M. Stability Prediction for Low Radial Immersion Milling / M. Davies, J. Pratt, B. Dutterer, T. Burns, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124/2, 2002. – P. 217–225.
34. Merdol S. Multi Frequency Solution of Chatter Stability for Low Immersion Milling / S. Merdol, Y. Altintas // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126/3. – 2004. – P. 459–466.
35. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling – Part I: General Formulation / E. Budak, Y. Altintas // ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, 1998. – P. 22–30.
36. Insperger T. Stability of the milling process / T. Insperger S. Gábor // Periodica Polytechnica. Engineering. Mechanical Engineering; Budapest 44.1. – 2000. – P. 47–57.
37. Tony L. S. Frequency Response to Improved Productivity / L. S. Tony, K. S. Smith, Springer, 2008. – 304 p.
38. Розенберг Ю. А. Резание материалов: Учебник для техн. вузов / Ю. А. Розенберг. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. – 294 с.
39. Tlusty J. Analysis of the state of research in cutting dynamics, CIRPAnn. 27. – 1978.–P. 583–589.
40. Пат. UA 94974 Україна, МПК (2006) G01N11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливальних при кінцевому циліндрично-му фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логоминов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту ЗНТУ. – № 201405981; заявл. 02.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.
41. 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 : междунаучн.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 32–37.
42. Устройство для исследования условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей / [А. И. Гермашев, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Ю. Н. Внуков] // «Инженерия поверхности и реновация изделий»: тезисы доклада XV Международной научно-технической конференции (Затока, Одесская обл., 01–05 июня 2015 г.) – К. : АТМ Украины, 2015. – С. 45–47.
43. Методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании / [Ю. Н. Внуков, А. И. Гермашев, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова] // Резание и инструмент в технологических системах : междунаучн.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С. 48–56.

Одержано 10.10.2017

© Д-р техн. наук С. Б. Беликов<sup>1</sup>, канд. техн. наук А. И. Гермашев<sup>1</sup>, канд. техн. наук В. А. Логоминов<sup>1</sup>, канд. техн. наук Е. Б. Козлова<sup>1</sup>, В. А. Кришталь<sup>2</sup>

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

**Byelikov S., Germashev A., Logominov V., Kozlova Ye., Krishtal V. Features of end milling of complicated profile thin-wall pieces**