

УДК 621.914.2

- Гермашев А. И.** канд. техн. наук, докторант Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [germashevanton@gmail.com](mailto:germashevanton@gmail.com);
- Беликов С. Б.** д-р техн. наук, профессор, ректор Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [rector@zntu.edu.ua](mailto:rector@zntu.edu.ua);
- Логоминов В. А.** канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [logominov.v@gmail.com](mailto:logominov.v@gmail.com);
- Козлова Е. Б.** канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: [kozlova@zntu.edu.ua](mailto:kozlova@zntu.edu.ua);
- Кришталь В. А.** ГП «Ивченко-Прогресс», начальник цеха, Запорожье, Украина, e-mail: [khristalvladimir@gmail.com](mailto:khristalvladimir@gmail.com)

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ

**Цель работы.** Описание методики автоматизированного расчета и выбора оптимальных режимов фрезерования тонкостенных элементов деталей.

**Методы исследования.** Для проведения исследований использовали авторский метод расчета оптимальных условий фрезерования тонкостенных деталей, который лег в основу разработанного программного обеспечения для оптимизации процесса выбора режимов резания. Для определения характеристик детали применяли методом ударного возбуждения детали с помощью молотка с акселерометром. Апробация разработанного программного обеспечения проводилась на экспериментальном стенде для исследования процессов концевой фрезерования, позволяющем записывать колебания в процессе фрезерования и изучать влияние режимов резания на условия возникновения и поддержания колебательных процессов при фрезеровании тонкостенных элементов деталей.

**Полученные результаты.** Авторами предложен аналитический расчет оптимальных условий фрезерования тонкостенных элементов деталей. В основу методики положен расчет амплитуды колебаний детали при вынужденных колебаниях, так как состояние процесса обработки и качество обработанной поверхности зависят именно от вынужденных колебаний. Расчет оптимальных режимов фрезерования тонкостенного элемента детали выполняли в три этапа: выбор метода обработки, ввод геометрических параметров и материала инструмента, режимов резания и задание характеристик тонкостенной детали и параметров станка. После выполнения вышеуказанных этапов программа осуществляет расчет графика максимальной амплитуды колебаний детали в зависимости от частоты вращения шпинделя. Скоростные диапазоны с минимальной и максимальной амплитудой колебаний детали определяют наилучшие и наихудшие условия обработки тонкостенного элемента детали. Экспериментальные исследования проводили при наибольших и наименьших расчетных значениях амплитуды колебания детали. При частотах вращения шпинделя, спрогнозированных как виброустойчивые, получен низкий уровень колебания детали. Полученные параметры профилей обработанных поверхностей образцов при режимах фрезерования, где наблюдали наибольший и наименьший уровень колебания детали, показали значительную разницу в качестве обработанной поверхности в зависимости от условий фрезерования тонкостенного элемента детали. Как расчетные, так и экспериментальные данные показали возможность снижения уровня вибраций до 4 раз и улучшение шероховатости обработанной поверхности до 30 раз.

**Научная новизна.** Разработана методика автоматизированного выбора режимов фрезерования тонкостенных элементов деталей, позволяющая прогнозировать вибрационные условия и, соответствующее им качество обработанной поверхности.

**Практическая ценность.** Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования точности и качества обработки поверхности при высокоскоростном фрезеровании в условиях возникновения вибраций.

**Ключевые слова:** фрезерование; вынужденные колебания; тонкостенный элемент детали; профилограмма; осциллограмма; амплитуда.

## ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование сложно-профильных тонкостенных элементов деталей является одним из новейших этапов в истории резания металлов, однако возможности данного метода формообразования поверхности, производительность и эксплуатационные преимущества изготавливаемых деталей вывели его на одну из лидирующих позиций среди процессов механической обработки.

Использование деталей с тонкостенными элементами наиболее широко распространено в авиакосмической отрасли, где одновременно предъявляются как повышенные требования к низкой массе и прочности конструкций, так и к качеству обрабатываемых поверхностей. Множество деталей, имеющих тонкостенные элементы, входят в конструкцию авиационного газотурбинного двигателя (АГТД). Примером могут служить рабочие лопатки. Вследствие воздействия в эксплуатации широкого спектра динамических нагрузок рабочие лопатки являются одними из наиболее высоконапряженных деталей двигателя. Технологические допуски на изготовление лопаток обуславливают отклонения от строгой поворотной симметрии венцов, вследствие чего возможен существенный разброс в уровне их резонансных напряжений, а наличие погрешностей на поверхности после механической обработки нарушает равномерность аэродинамического обтекания лопаточных профилей, что является одной из причин их флаттера и приводит к концентрации напряжений, что снижает циклическую прочность лопаток. Поэтому в производстве двигателей предъявляют высокие требования к точности геометрических размеров лопаток, к их взаимному расположению в венце, а также качеству обрабатываемой поверхности пера, выполнение которых возможно лишь на этапе механической обработки лопаток. Изготовление подобных деталей осуществляется путем удаления до 90 % припуска заготовки, что диктует необходимость в высокой производительности данного процесса.

Ввиду недостаточной жесткости тонкостенных элементов деталей (ТЭД) существует большая вероятность появления вибраций и снижения качества поверхности детали. При этом размерная точность и шероховатость поверхности существенно зависят от режимов резания. Так, например, параметр шероховатости может изменяться до 10 раз (в зависимости от статических и динамических характеристик детали) при изменении частоты вращения шпинделя на 5–10%.

## 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Общепринятыми подходами при выборе режимов резания являются использование справочной литературы, а также рекомендаций непосредствен-

но производителя металлорежущего инструмента. При этом значение скорости резания ограничено температурой в зоне резания, при которой сохраняется высокий период стойкости инструмента. Кроме этого данные рекомендации подразумевают высокую стабильность процесса резания.

Обработка ТЭД имеет некоторые особенности кинематики процесса [1], которые необходимо учитывать для получения высокой эффективности и качества обработки. Во-первых, фрезерование осуществляется с малыми радиальными –  $a_e$  и осевыми –  $a_p$  глубинами. Вследствие этого, происходит периодическая потеря контакта между инструментом и тонкостенной деталью в момент, когда один зуб фрезы уже вышел из зацепления с припуском, а следующий еще не вошел. Данное обстоятельство обуславливает малую дугу контакта инструмента и детали. В сочетании с высокой круговой скоростью фрезы и частотой собственных колебаний рабочей лопатки, которая находится в диапазоне 200–2500 Гц, в зависимости от формы пера, упругая система тонкостенной детали не успевает совершить даже одного автоколебания за время резания одним зубом фрезы. Стоит отметить что высокая прерывистость процесса обработки обеспечивает отличное охлаждение инструмента так, как зуб фрезы находится в зоне резания лишь малую долю оборота. Данное обстоятельство и обеспечивает возможность реализации высокоскоростной обработки.

В связи с этим стандартные подходы выбора режимов резания не могут быть применимы из-за того, что температура в зоне резания относительно мала, и лимитирующим фактором при обработке являются вибрации, возникновение которых зависит от индивидуальных геометрических характеристик и материала детали, изменяющихся в процессе обработки, от одного технологического перехода к другому.

Таким образом, выбор режимов резания при обработке ТЭД требует индивидуального подхода. В такой ситуации зачастую прибегают к экспериментальному выбору параметров обработки. Однако, такой подход является трудоемким, требует тестовых деталей, а самое главное, не может обеспечить получения наилучшего результата, так как существует большое множество возможных комбинаций режимов резания.

## 2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью статьи является создание методики автоматизированного расчета безвибрационных режимов резания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей.

## 3 ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На данный момент широко известны методики аналитического расчета стабильных условий

фрезерования [2]–[8]. Эти подходы берут свое начало еще с 50-х годов XX века и изначально были разработаны для точения (одноточечной обработки), а немного позднее успешно адаптированы для фрезерования. Стоит отметить, что более 300 ведущих машиностроительных предприятий мира используют построение диаграмм устойчивости, как основу определения режимов резания для операций точения и фрезерования, в том числе и ТЭД. Определение стабильных условий резания основывается на регенеративной теории (автоколебательном процессе). Однако, как было упомянуто выше, при обработке ТЭД автоколебания существенно не влияют на процесс резания. Именно поэтому установлено, что чем больше нелинейность системы, тем меньше уровень сходимости расчетных результатов и экспериментальных данных. То есть, для случая прерывистого резания использование диаграмм устойчивости не может гарантировать получение удовлетворительного результата.

Авторами предложен аналитический расчет, который позволяет определить оптимальные условия фрезерования ТЭД. В основу расчета положен учет воздействия вынужденных, а не автоколебаний. В ходе проведения экспериментальных исследований высокоскоростного фрезерования ТЭД, установлено, что состояние процесса обработки, и, как следствие, качество обработанной поверхности зависят именно от вынужденных колебаний, возникающих вследствие возбуждения упругой системы тонкостенной детали зубьями фрезы. Стоит отметить, что использование данного подхода имеет место исключительно при высокоскоростной обработке в условиях прерывистого резания. То есть, он применим для всех операций контурного фрезерования на современных станках с ЧПУ. Данный подход был апробирован при различных условиях обработки: различных характеристиках деталей, широком диапазоне частот вращения шпинделя, скоростях резания, подач, осевых и радиальных глубин резания, различной геометрии инструмента.

Для автоматизации процесса расчета режимов резания разработано программное обеспечение, которое позволяет выполнить всю процедуру расчета. Также предложена измерительная аппаратура и разработаны схемы ее подключения для получения входных параметров расчета.

Расчет режимов резания ТЭД осуществляется в три этапа. На первом – требуется выбрать метод обработки (рис. 1). Модули программы позволяют произвести расчет диаграмм устойчивости для определения стабильных условий резания в условиях классического фрезерования (в зоне резания всегда находится один и более зубьев фрезы) или точения. Для случая прерывистого резания (фрезерования ТЭД) следует выбрать метод контурного фрезерования.

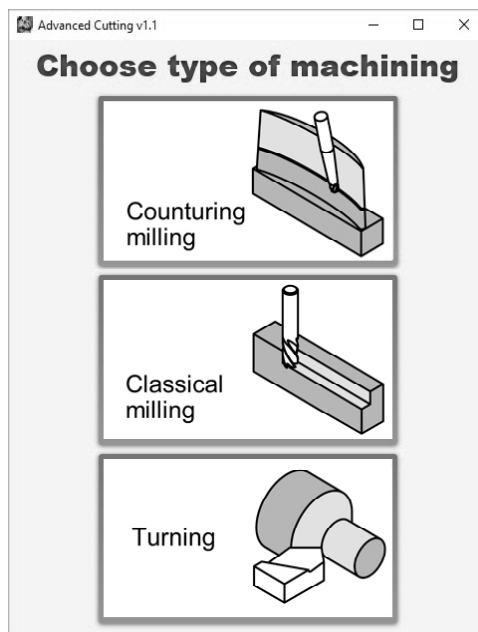


Рисунок 1. Диалоговое окно выбора метода обработки

Следующим шагом является ввод геометрических параметров и материала фрезы, значений радиальной и осевой глубин резания, угла наклона инструмента при многокоординатной обработке, обрабатываемого материала, подачи на зуб, вида обработки: черновая, получистовая или чистовая (рис. 2).

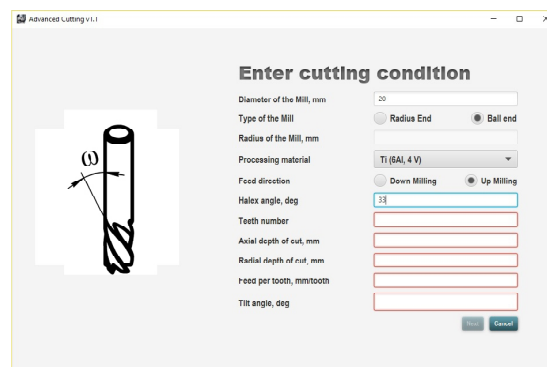


Рисунок 2. Диалоговое окно ввода данных

На данном этапе происходит проверка соответствия желаемых параметров фрезерования и выбранного метода обработки. Если программа не устанавливает факт прерывистого резания, то рекомендуется выбрать другой метод обработки, где режимы резания будут рассчитаны, основываясь на других подходах. Стоит отметить, что при обработке ТЭД величина осевой и радиальной глубины обусловлена геометрической формой детали и является обязательной для ввода. Также исследования показывают, что изменение этих величин, как и подачи, в определенном диапазоне не несет негативного влияния на качество обработки. Поэтому, в зависимости от типа

операции, программа предлагает скорректировать некоторые величины обработки.

На следующем этапе производится ввод характеристик тонкостенной детали и параметров станка. Для ввода параметров детали может быть использован как ручной ввод частоты собственных колебаний (ЧСК) упругого элемента (рабочей лопатки), коэффициент демпфирования и жесткость, так и загрузка сигнала с измерительной аппаратуры, которая выполняет диагностику детали и/или инструмента и представляет измерительный комплекс, показанный на рис. 3. Измерительный комплекс состоит из специального ударного молотка с закрепленным на нем акселерометром, индуктивного датчика для регистрации колебаний детали или инструмента, усилителя и аналого-цифрового преобразователя, и программного обеспечения.

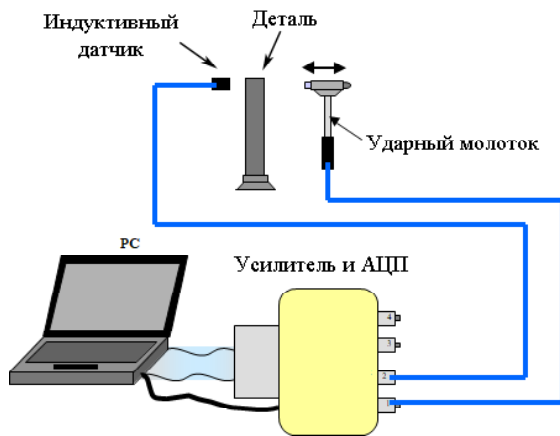


Рисунок 3. Схема измерений динамических характеристик детали

Измерение динамических характеристик детали производится следующим образом. С помощью ударного молотка в детали (или инструменте) возбуждаются колебания, которые регистрируются индуктивным датчиком (рис. 4). Аналоговые сигналы от акселерометра, установленного на ударном молотке, и индуктивного датчика усиливаются и преобразуются АЦП в цифровой сигнал, который обрабатывается программным обеспечением. В результате получается амплитудно-частотные характеристики детали (и/или инструмента).

На рис. 5 показаны действительная и мнимая часть амплитудно-частотной характеристики. По этой характеристике мы можем установить жесткость, частоту собственных колебаний и коэффициент демпфирования детали.

Выбор модели станка производится для определения скоростного диапазона частот вращения шпинделя. Также возможен ручной ввод данного параметра (рис. 6). Так как частота вращения шпинделя является основополагающим параметром

при выборе виброустойчивых условий фрезерования, незначительное изменение данного параметра может способствовать как стремительному улучшению, так и ухудшению состояния процесса резания.

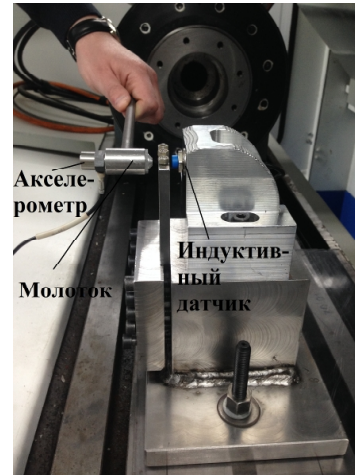


Рисунок 4. Процесс определения характеристик детали методом ударного возбуждения с помощью специального молотка с акселерометром

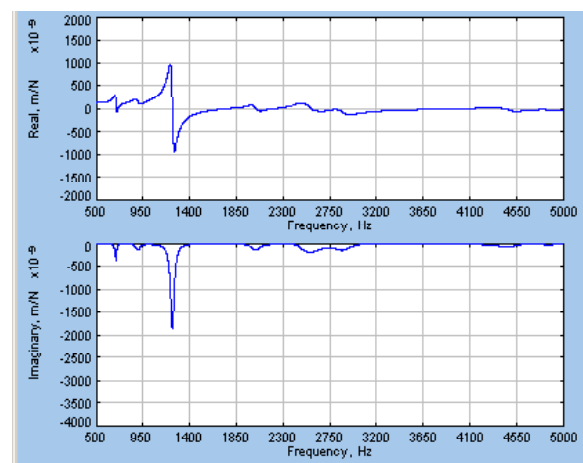


Рисунок 5. Действительная и мнимая часть амплитудно-частотной характеристики детали

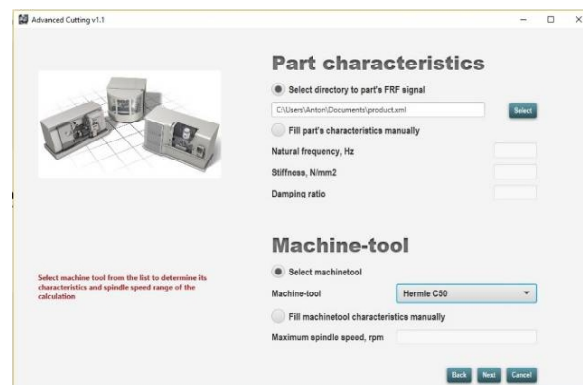


Рисунок 6. Диалоговое окно ввода характеристик детали и параметров станка

После выполнения вышеуказанных шагов программа осуществляет расчет графика максимальной амплитуды колебаний детали в зависимости от частоты вращения шпинделя. Скоростные диапазоны с минимальной амплитудой колебаний детали определяют наилучшие условия обработки ТЭД.

Апробацию разработанного программного обеспечения проводили на стенде для исследования процессов концевой фрезерования [9–11], конструкция которого показана на рис. 7.

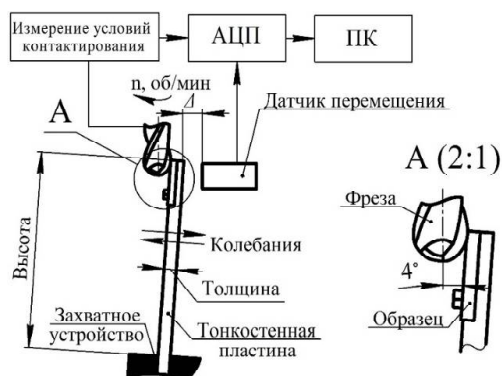


Рисунок 7. Экспериментальный стенд

Захватное устройство стенда представляет собой массивное основание, которое через электроизоляцию устанавливается на столе фрезерного станка. На пластине жестко закрепляется обрабатываемый образец. При фрезеровании, в результате действия силы отжима со стороны фрезы, происходит перемещение образца, величину которого измеряют датчиком по изменению зазора —  $\Delta$ . К измерительному стенду подключено электроконтактное устройство, позволяющее записывать сигнал контакта и совмещать его с сигналом перемещения образца.

Экспериментальные исследования проводили на фрезерном станке с ЧПУ Huron CX10. В качестве упругого элемента использовалась консольно-зашемленная пластина (материал Сталь 65Г ГОСТ 1133-71) толщиной  $h = 8$  мм и шириной  $b = 60$  мм, вылет пластины составлял  $H = 80$  мм. На свободном конце пластины был жестко закреплен образец (материал Ст. 3 ГОСТ 380-2005). Инструмент — твердосплавная концевая сферическая фреза (угол наклона винтовой режущей кромки  $\omega = 30^\circ$ ,  $z = 6$ ). Величина наклона нормали инструмента относительно заготовки составляла  $4^\circ$ .

После ввода в программу всех параметров с учетом характеристик тонкостенной детали (табл. 1), измеренных вышеописанным способом, был получен график, приведенный на рис. 8.

Анализируя полученную зависимость, следует отметить значительное изменение характера колебательного движения тонкостенной детали во время обработки при различных частотах вращения шпинделя.

Таблица 1. Характеристики тонкостенной пластины с образцом

Частота собственных колебаний $f_n$ (Гц)	Коэффициент демпфирования $\xi$	Статическая жесткость $C$ (Н/м)
725	0,03	$2100 \times 10^3$

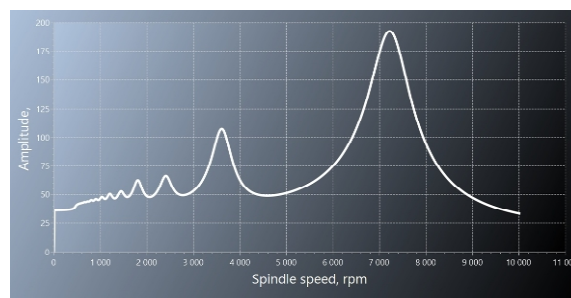


Рисунок 8. График максимальной амплитуды колебания детали при различных частотах вращения шпинделя

Экспериментальные тесты проводили при наибольших и наименьших расчетных значениях амплитуды колебания детали. На рис. 9 показаны сигналы с измерительной аппаратуры экспериментального стенда (отклонение детали и сигнал наличия контакта между деталью и инструментом, момент начала и окончания резания зубом фрезы) в зависимости от различных значений частоты оборотов шпинделя.

Выбраны участки обработки в 50 резов зубьями фрезы. Отмечено положение детали в момент начала и окончания резания каждым зубом фрезы. Авторами установлено, что девиация положения детали в момент начала резания определяет качество обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании ТЭД. Сигнал колебания детали полностью согласуется с полученным расчетным графиком. При частотах вращения шпинделя, спрогнозированных как виброустойчивые ( $n = 5200$  об/мин и  $n = 9600$  об/мин) был получен низкий уровень колебания детали. В то время как при  $n = 3700$  об/мин и  $n = 7200$  об/мин наблюдали увеличение амплитуды колебаний детали до 4 и более раз. Также стоит отметить, что при данных режимах характер колебания детали приобретает вид «биений», что впоследствии отображается на профиле обработанной поверхности и является причиной ухудшения параметра шероховатости. Такое поведение детали связано с близким расположением частот собственных колебаний детали и зубцовых частот вращения инструмента.

На рис. 10, 11 приведены профилограммы и фотографии профилей обработанных поверхностей образцов при режимах фрезерования, где наблюдали наибольший и наименьший уровень колебания детали.

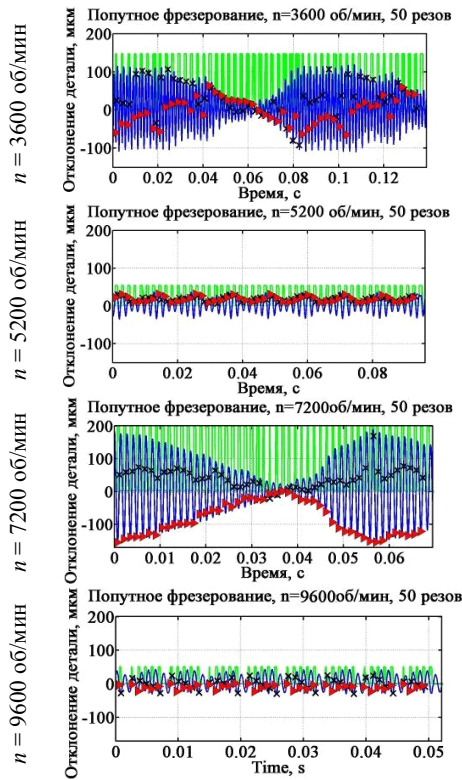


Рисунок 9. Сигналы с измерительной аппаратуры для выбранных режимов фрезерования

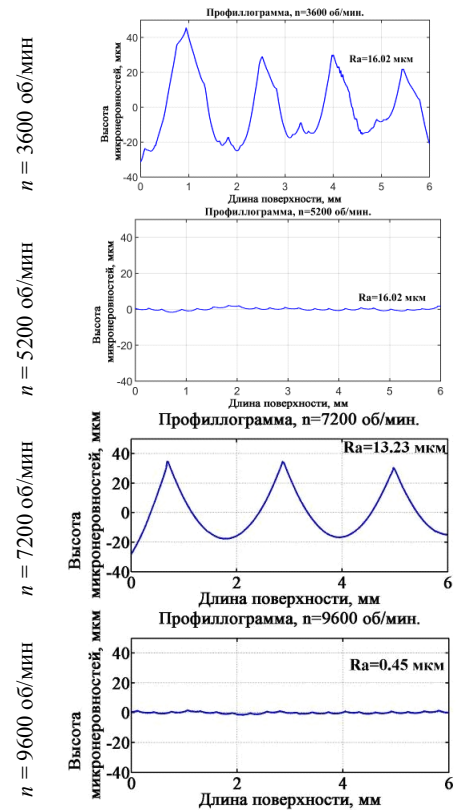


Рисунок 10. Профиллограммы обработанной поверхности для выбранных режимов фрезерования

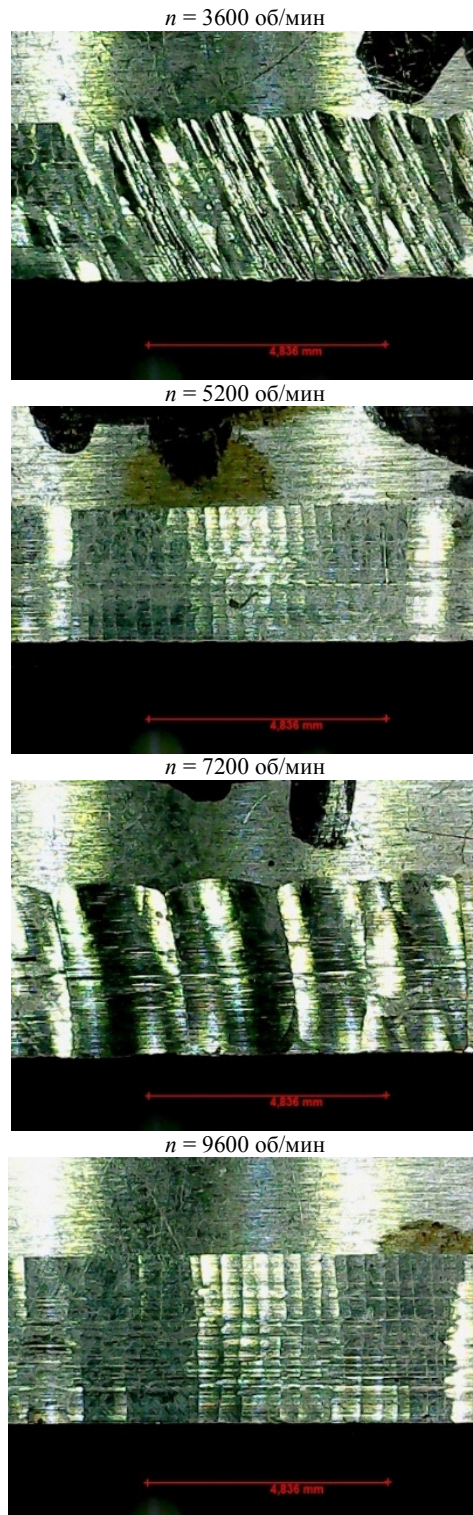


Рисунок 11. Фотографии профилей обработанных поверхностей образцов при выбранных режимах фрезерования

Профиль образцов наглядно показывает большую разницу в качестве обработанной поверхности в зависимости от условий фрезерования ТЭД. Для рассматриваемых характеристик тонкостенной детали разница составила до 30 раз.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс выбора оптимальных режимов резания для широкой номенклатуры деталей для операций фрезерования и точения.

2. В зависимости от условий резания возможен выбор режимов обработки с использованием различных подходов, основанных как на теории автоколебаний, так и на возбуждении системы вынужденными колебаниями.

3. Проведенная апробация программного обеспечения показала отличную согласованность с экспериментальными данными.

4. Как расчетные, так и экспериментальные данные показывают, что в зависимости от частоты вращения шпинделя, возможно снижение уровня вибраций до 4 раз, а также улучшение шероховатости обработанной поверхности до 30 раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Особенности концевое фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей / С. Б. Беликов, А. И. Гермашев, В. А. Логоминов, Е. Б. Козлова, В. А. Кришталь // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 2. – С. 15–22.
- [2]. Merritt H. E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H. E. Merritt // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87. – P. 447–454.
- [3]. Week M. Handbook of Machine Tools / M. Week. – Wiley, N. Y. – 1985. – Vol. 4. – 186 p.
- [4]. Minis I. Improved Methods for the Prediction of Chatter in Turning / I. Minis, E. Magrab, I. Pandelidis // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1990. – Vol. 112. – P. 28–35.
- [5]. Tlusty J. Dynamics of high-speed milling / J. Tlusty // Journal of Engineering for Industry. – 1986. – Vol. 108. – P. 59–67.

- [6]. Tlusty J. Special aspects of chatter in milling / J. Tlusty, F. Ismail // Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design. – Vol. 105. – 1983. – P. 24–32.
- [7]. Insperger T. Semi-discretization for time-delay systems: stability and engineering applications / T. Insperger, G. Stýřbn // Springer Science & Business Media. – Vol. 178. – 2011. – P. 174.
- [8]. Merdol S. D. Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling / S. D. Merdol, Y. Altintas // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 2004, 126/3. – P. 459–466.
- [9]. Пат. UA 94974 Україна, МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логоминов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту ЗНТУ. – №u201405981 ; заявл. 02.06.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.
- [10]. 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.
- [11]. Гермашев А. И. 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, 01–05 июня 2015 г., г. Затока. – К. : АТМ України, 2015. – С. 45–47.

Статья поступила в редакцию 20.04.2018

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЕТАЛЕЙ

- Гермашев А. І.** канд. техн. наук, докторант Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: germashevanton@gmail.com*;
- Беліков С. Б.** д-р техн. наук, професор, ректор Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: rector@zntu.edu.ua*;
- Логоминов В. О.** канд. техн. наук, доцент кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: logom-pov.v@gmail.com*;
- Козлова О. Б.** канд. техн. наук, доцент кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: kozlova@zntu.edu.ua*;
- Кришталь В. О.** ДП «Івченко-Прогрес», начальник цеху, Запоріжжя, Україна, *e-mail: khristalvladimir@gmail.com*

**Мета роботи.** *Опис методики автоматизованого розрахунку і вибору оптимальних режимів фрезерування тонкостінних елементів деталей.*

**Методи дослідження.** *Для проведення досліджень використовували експериментальний метод з застосуванням стенду, конструкція якого дозволяє створювати різні умови обробки тонкостінних елементів деталей, записувати коливання в процесі різання, окремо вивчати вплив на їх збудження і підтримання пружної системи деталі, режимів різання і геометрії інструменту. Фрезерування виконували однозубою фрезою з режимами різання, при яких виникають автоколивання. Для визначення закономірностей руху деталі при різанні використовували метод поєднання фрагментів осцилограми.*

**Отримані результати.** *Авторами запропонований аналітичний розрахунок оптимальних умов фрезерування тонкостінних елементів деталей. В основу методики покладено розрахунок амплітуди коливань деталі при вимушених коливаннях, так як стан процесу обробки і якість обробленої поверхні залежать саме від вимушених коливань. Розрахунок оптимальних режимів фрезерування тонкостінного елемента деталі виконували в три етапи: вибір методу обробки, введення геометричних параметрів і матеріалу інструменту, режимів різання і завдання характеристик тонкостінної деталі і параметрів верстака. Після виконання вищевказаних етапів програма здійснює розрахунок графіка максимальної амплітуди коливань деталі в залежності від частоти обертання шпинделя. Швидкісні діапазони з мінімальною і максимальною амплітудою коливань деталі визначають найкращі і найгірші умови обробки тонкостінного елемента деталі. Експериментальні дослідження проводили при найбільших і найменших розрахункових значеннях амплітуди коливання деталі. При частотах обертання шпинделя, які були визначені як вібростійкі, отримано низький рівень коливання деталі. Отримані параметри профілів оброблених поверхонь зразків при режимах фрезерування, де спостерігали найбільший і найменший рівень коливання деталі, показали значну різницю в якості обробленої поверхні в залежності від умов фрезерування тонкостінного елемента деталі. Як розрахункові, так і експериментальні дані показали можливість зниження рівня вібрацій до 4 разів і поліпшення шорсткості обробленої поверхні до 30 разів.*

**Наукова новизна.** *Розроблено методику автоматизованого вибору режимів фрезерування тонкостінних елементів деталей, що дозволяє прогнозувати вібраційні умови і відповідну їм якість обробленої поверхні.*

**Практична цінність.** *Отримані результати можуть бути використані для прогнозування точності та якості обробки поверхні при високошвидкісному фрезеруванні в умовах виникнення вібрацій.*

**Ключові слова:** *фрезерування; вимушені коливання; тонкостінний елемент деталі; профілограма; осцилограма; амплітуда.*

## AUTOMATION OF THE PROCESS OF SELECTING THE MILLING MODES OF THIN-WALL ELEMENTS OF PARTS

- Germashev A. I.** Ph.D, Postdoctoral fellow of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [germashevanton@gmail.com](mailto:germashevanton@gmail.com);
- Byelikov S. B.** Dr. Tech. Sci., Professor, Rector of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [rector@zntu.edu.ua](mailto:rector@zntu.edu.ua);
- Logominov V. A.** Ph.D, Associate professor of the Technological Engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [logominov.v@gmail.com](mailto:logominov.v@gmail.com);
- Kozlova Ye. B.** Ph.D, Associate professor of the Technological Engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [kozlova@zntu.edu.ua](mailto:kozlova@zntu.edu.ua);
- Krishtal V. A.** Zaporozhye Machine-Building Design Bureau Progress State Enterprise named after Academician A. G. Ivchenko, Head of Workshop, e-mail: [khristalvladimir@gmail.com](mailto:khristalvladimir@gmail.com)

**Purpose.** *Description of the method automatization of optimal cutting condition determination for milling of thin-walled structures.*

**Methodology.** *To conduct research, the proposed by authors method of cutting condition determination for milling of thin-walled structures was used as a base of developed software. Part characteristics is determined by impact hammer with an accelerometer in a composition with inductive non-contact displacement sensor that measure part response after excitation. Approbation of the developed software was carried out at the experimental setup for the study of the end milling processes, which allows recording the oscillations in the milling process and studying the influence of cutting condition on the state of cutting process of thin-walled elements of the part.*



**Findings.** The authors propose an analytical calculation of the optimal conditions for milling thin-walled structures. The method is based on the calculation of the part oscillation amplitude under forced oscillations, since the state of the milling process and the quality of the surface finish are determined by the influence of the forced oscillation. Calculation of optimal milling conditions for a thin-walled component are performed in three stages: selection of the mechanical treatment method, input of geometric parameters and tool material, cutting modes and specification of the thin-walled component and machine-tool parameters. After completing the above steps, the software calculates the graph of the maximum amplitude of the oscillations of the part, depending on the spindle speed. Speed ranges with minimum and maximum amplitude of the vibration of the part are determine the best and worst conditions for processing of the thin-walled component of the part. Experimental studies were carried out at the largest and smallest calculated values of the vibration amplitude of the part. At the spindle speed predicted as vibration-proof, a low level of oscillation of the part was obtained. The obtained parameters of the profiles of the samples machined surfaces, where the highest and the lowest level of vibration of the part were observed, shown a significant difference in the quality of the treated surface, depending on the milling conditions of the thin-walled component of the part. Both calculated and experimental data showed the possibility of reducing the vibration level up to 4 times and improving the roughness of the surface finish up to 30 times in the certain condition.

**Originality.** The technique of the automatization of optimal cutting condition determination for milling of thin-walled structures was developed, which allows to predict the vibrational conditions and the quality of the treated surface corresponding to them.

**Practical value.** The results obtained can be used to predict the accuracy and quality of surface finish for high-speed milling under conditions of vibration.

**Keywords:** milling; forced oscillations; thin-walled component parts; profile; oscillogram; amplitude.

## REFERENCES

- [1]. Belikov S.B., Germashev A.I., Logominov V.A., Kozlova E. B., Krishtal V. A. (2017). Osobennosti koncevogo frezerovaniya slozhno-profil'nyh tonkostennykh detalej [Features of end milling of complex-profile thin-walled parts]. *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2, 15–22. (in Russian)
- [2]. Merritt H. E. (1965). Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 87, 447–454.
- [3]. Week M. (1985). *Handbook of Machine Tools*. Wiley N. Y.
- [4]. Minis I. (1990). Improved Methods for the Prediction of Chatter in Turning. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 112, 28–35.
- [5]. Tlusty J. (1986). Dynamics of high-speed milling. *Journal of Engineering for Industry*, 108, 59–67.
- [6]. Tlusty J., Ismail F. (1983). Special aspects of chatter in milling. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 105, 24–32.
- [7]. Insperger T., Stépán G., Insperger T. (2011). Semi-discretization for time-delay systems: stability and engineering applications. *Springer Science & Business Media*, 178, 174.
- [8]. Merdol S. D., Altintas Y. (2004). Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling. *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 126/3, 459–466.
- [9]. Logominov V. O., Germashev A. I., Djadja S. I., Kozlova O. B. (2014). *UA Patent No.94974* Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).
- [10]. Vnukov Ju.N., Logominov V.A., Kamorkin P.A. (2011). Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkih detalej pri koncevom frezerovanii [Stand for the study of mechanical vibrations in the milling of dead surfaces in end milling]. *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*, 80, 32–37.
- [11]. Germashev A. I. (2015). Ustrojstvo dlja issledovanija uslovij kontaktirovanija instrumenta s detal'ju pri cilindricheskom frezerovanii tonkostennykh detalej. Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij : *Tezisy doklada XV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 01–05 iyunja 2015, Zatoka*, 45–47.