



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Исследование взаимосвязи режущей способности инструмента с параметрами акустического сигнала в процессе профильного шлифования

Дмитрий Ардашев <sup>a</sup>, Александр Жуков <sup>b, \*</sup>

Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, [ardashevdv@susu.ru](mailto:ardashevdv@susu.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9328-7148>, [zhukovas@susu.ru](mailto:zhukovas@susu.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.1+534.631

#### История статьи:

Поступила: 30 августа 2022  
 Рецензирование: 06 сентября 2022  
 Принята к печати: 21 сентября 2022  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2022

#### Ключевые слова:

Профильное шлифование  
 Профилированный шлифовальный круг  
 Текущая режущая способность  
 Анализ акустического сигнала  
 Спектральный состав  
 Частота собственных колебаний  
 Информативная частота  
 Звуковой индекс

#### Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Современное машиностроение плотно сопряжено с цифровыми технологиями управления производством, для которых важным аспектом является сбор достоверной информации о текущем состоянии систем. Акустические методы текущего контроля режущей способности инструмента при этом обладают значительным потенциалом за счет возможности непрерывного получения актуальных данных о параметрах процесса обработки. Профильное шлифование является одним из широко распространенных методов обработки поверхностей сложной конфигурации. Высокая значимость данного метода заключается в высокой степени ответственности фасонных деталей, получаемых с его помощью. Параметр износа профилированных шлифовальных кругов нуждается в текущем контроле в той же степени, как и другие виды режущего инструмента. При этом акустические методы исследования не нашли широкого применения по отношению к профильному шлифованию. Ввиду этого настоящая работа направлена на исследование влияния степени износа инструмента на акустические характеристики шлифования при применении шлифовальных кругов различного профиля. **Целью работы** является определение акустических параметров обработки профильным кругом с применением схемы плоского шлифования по мере его износа в сравнении с аналогичным процессом с применением круга прямого профиля. В качестве основных **методов исследования** используется эксперимент по изучению звуковых явлений, сопровождающих шлифование с применением кругов разного профиля. Проводится анализ акустического сигнала шлифования, анализ спектра его частотного состава. Исследуются частоты собственных колебаний шлифовальных кругов разного профиля, определяется их звуковой индекс как критерий оценки их характеристик. Проводится сравнение акустических характеристик процесса шлифования с применением шлифовальных кругов разного профиля. Используется также регрессионный анализ акустических данных, полученных в результате эксперимента. **Результаты и обсуждение.** Получены спектрограммы частот собственных колебаний исследуемых кругов, а также ряд спектрограмм акустического сигнала, сопровождающего процесс обработки для различных технологических условий. В результате сравнения полученных спектрограмм были определены информативные частоты процессов шлифования. Разработаны математические модели зависимости уровня звука от значения периодической вертикальной подачи  $S_v$  на глубину  $t$  и продолжительности обработки  $T$ . Установлено, что значение периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  имеет большее влияние на акустический показатель по сравнению с продолжительностью обработки. Практическая значимость и перспективность результатов работы заключается в возможности повышения эффективности процессов профильного шлифования за счет рационального использования ресурса работоспособности инструмента.

**Для цитирования:** Ардашев Д.В., Жуков А.С. Исследование взаимосвязи режущей способности инструмента с параметрами акустического сигнала в процессе профильного шлифования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 64–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-64-83.

## Введение

Контроль состояния инструмента (tool condition monitoring – TCM) является одним из важнейших элементов в интеллектуальных си-

стемах автоматизации процессов механической обработки [1]. Неизбежный износ инструмента, сопутствующий такой обработке, зависит от ее технологических условий и оказывает непосредственное влияние на свойства конечного продукта. Поэтому отслеживание параметров износа и точное определение текущей работоспособности инструмента выходят на первый план в вопросах, касающихся обеспечения качества продукции.

#### \*Адрес для переписки

Жуков Александр Сергеевич, аспирант  
 Южно-Уральский государственный университет,  
 пр. Ленина, 76,  
 454080, г. Челябинск, Россия  
 Тел.: 8 (351) 272-32-94, e-mail: zhukovas@susu.ru

Шлифование как один из широко распространенных методов формообразования остро нуждается в том, чтобы обработка велась только инструментом, состояние которого обеспечит надлежащее качество изделия. Для возвращения шлифовальному кругу (ШК) первоначальных свойств используется правка, которая из технологических и экономических соображений должна применяться в наиболее рациональный момент. ТСМ является наиболее эффективным инструментом для решения задачи по определению этого момента. Дополнительная значимость ТСМ при шлифовании заключается в том, что данный вид обработки часто выполняется в конце технологической цепочки и на ней осуществляется чистовая обработка.

Среди большого количества подходов к определению состояния ШК интерес вызывают методы, не требующие остановки производственного процесса для установления параметров износа, т. е. косвенные методы. Акустические методы (акустико-эмиссионный и шумодиагностический согласно ГОСТ 23829–85) являются косвенными и одновременно пассивными, что означает отсутствие внешнего источника энергии, осуществляющего воздействие на объект исследования.

Существует достаточно много исследований, сосредоточенных на определении и прогнозировании состояния ШК в процессе обработки с применением сигналов акустической эмиссии [2]. Показано, что этот метод имеет достаточно высокую точность, информативность [3] и чувствительность [4, 5] для определения текущей работоспособности инструмента. Однако широкого распространения данный метод не получил. Это связано с высокой стоимостью оборудования, необходимостью проведения специфических преобразований сигнала для его фильтрации [6] и т. д. При этом метод, действующий непосредственно акустическую волну, генерируемую колебаниями ШК в процессе обработки (шумодиагностический), исследован значительно слабее, несмотря на сопоставимый практически полезный потенциал [7].

На сегодняшний день большинство основных типов операций механической обработки исследовались с применением акустических методов (как АЭ, так и шумодиагностического): токарная обработка [8, 9], фрезерование [10] и микро-

фрезерование [11], сверление [12], шлифование [13, 14]. Рассмотрены всевозможные обрабатываемые материалы – хрупкие [15], пластичные, композиты [16], древесина [17]. Показана применимость метода для широкого спектра технологических условий разнообразных операций механической обработки для определения различных параметров исследуемого объекта. По мнению большинства авторов представленных выше работ, основной задачей данного метода является мониторинг (контроль) параметров износа режущего инструмента. При этом исследователи сходятся в том, что акустические методы мониторинга имеют высокую значимость для практического применения с целью повышения эффективности процессов.

Несмотря на все указанные достоинства акустических методов мониторинга и их широкое использование для различных видов обработки, определение состояния ШК данным методом при профильном шлифовании до сих пор не нашло широкого применения. Профильное шлифование применяется для чистовой обработки поверхностей сложной формы и предполагает обработку заготовки шлифовальным кругом с предварительно сформированным на нем профилем, обеспечивающим получение необходимых размеров, формы и качества поверхности (рис. 1). Значимость метода состоит в высокой

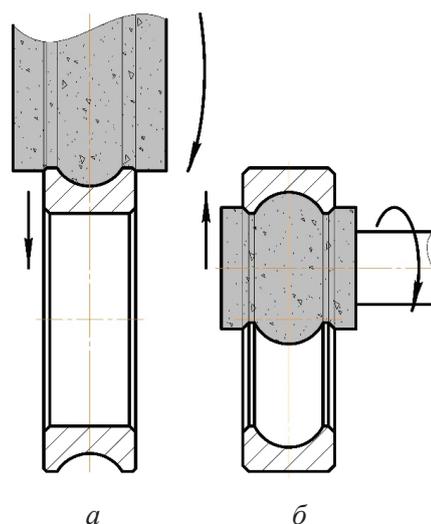


Рис. 1. Профильное шлифование колец подшипника:

*a* – наружное; *б* – внутреннее

Fig. 1. Profile grinding of bearing rings:

*a* – external; *б* – internal

степени ответственности фасонных деталей, получаемых с его помощью.

Проведенное обзорное исследование показало, что несмотря на высокую востребованность профильного шлифования в машиностроении акустические явления данного процесса изучены слабо. При этом запрос на определение текущей режущей способности профильного ШК и прогнозирование его периода стойкости существует [18–20]. Должным образом проведенное исследование этого вопроса в перспективе позволит рационализировать расход режущего инструмента и повысить эффективность процесса профильного шлифования в условиях цифрового производства.

Таким образом, разработка акустического метода мониторинга состояния инструмента применительно к профильному шлифованию целесообразна. Это обусловлено еще и тем, что необходимость своевременной правки профильного инструмента свойственна данному виду обработки так же, как и прочим видам шлифования.

**Цель** настоящего исследования состоит в определении акустических параметров плоского шлифования профильным кругом по мере его износа в сравнении с аналогичным процессом с применением круга прямого профиля. Ниже обозначен ряд задач, решение которых способствует достижению цели.

Поскольку звуковое давление, генерируемое процессом шлифования, является результатом собственных колебаний круга [21], возникает необходимость изучения частот собственных колебаний (ЧСК) шлифовальных кругов различного профиля.

Задача 1 – экспериментально определить ЧСК исследуемых шлифовальных кругов, провести аналитическое сравнение значений ЧСК шлифовальных кругов различного профиля.

Задача 2 – дать оценку вкладу работы основных систем экспериментальной установки на холостом ходу (в холостом режиме) в общий спектр акустических колебаний.

Задача 3 – экспериментально установить акустические параметры процесса плоского шлифования кругами различного профиля (спектральный состав, амплитуды уровня звука).

Задача 4 – провести качественное сравнение полученных данных, выявить отличительные особенности акустического сигнала при профильном шлифовании.

## Методика исследований

Экспериментальное исследование включает два этапа. На первом исследуются частоты собственных колебаний шлифовальных кругов. Второй этап сосредоточен на исследовании акустического сигнала, возникающего в процессе обработки. Каждый этап проводится с применением ШК прямого профиля и профильным кругом. Далее: ШК 1 – типовой шлифовальный круг прямого профиля; ШК 2 – шлифовальный круг, профилированный для обработки канавки (рис. 2).

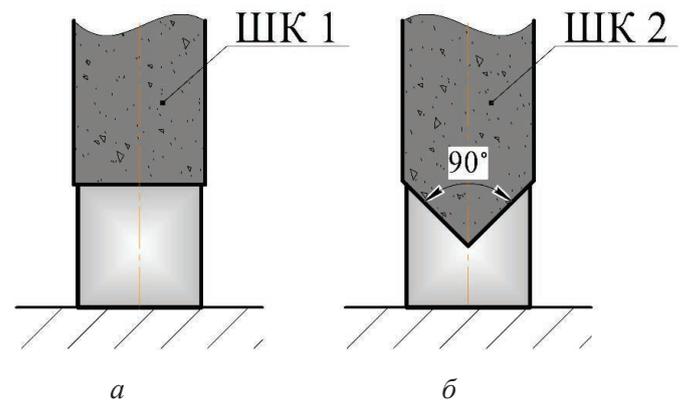


Рис. 2. Профиль применяемого инструмента:

*a* – ШК 1; *б* – ШК 2

Fig. 2. Profile of the tool used:

*a* – GW 1; *b* – GW 2

**Этап 1.** Предпосылкой к исследованию собственных колебаний ШК является существующая взаимосвязь между параметрами собственных колебаний, физико-механическими свойствами и геометрическими характеристиками твердого тела [22]:

$$f = F(a, \mu)C_L, \quad (1)$$

где  $F(a, \mu)$  – коэффициент формы, зависящий от геометрических размеров тела, его формы и коэффициента Пуассона;  $C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – параметр,

представляющий собой скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, материал которого аналогичен материалу рассматриваемого тела;  $E$  – модуль нормальной упругости;  $\rho$  – плотность материала.

Коэффициент формы  $F(a, \mu)$  в данном исследовании принимался в соответствии с рекомендациями нормативно-технической документации (ГОСТ Р 52710–2007 *Инструмент абразивный.*

Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн). Применение методики определения ЧСК кругов и их звуковых индексов, предложенное в данном стандарте, согласуется с решаемой задачей.

Цель данного этапа исследования состоит в определении спектрального состава акустического сигнала, возбуждаемого ударным воздействием в шлифовальных кругах различного профиля. Варьируемый фактор эксперимента – профиль ШК; исследуемый параметр – спектральный состав собственных колебаний ШК.

*Этап 2.* Исследуется косвенная (акустическая) характеристика процесса плоского маятникового шлифования в зависимости от профиля инструмента по мере его износа на разных режимах. Сравниваются характеристики звука, генерируемого аналогичными процессами с применением ШК 1 и ШК 2. Кроме геометрических параметров применяемые инструменты не имеют отличий – характеристики кругов идентичны.

### Экспериментальное исследование частот собственных колебаний шлифовальных кругов

В ходе исследования низкочастотных акустических колебаний (НАК) при плоском шлифовании Юганов В.С. [23] приходит к выводу, что имеет место почти полное совпадение информативных частот, характерных для процесса шлифования и собственных частот круга (рис. 3).

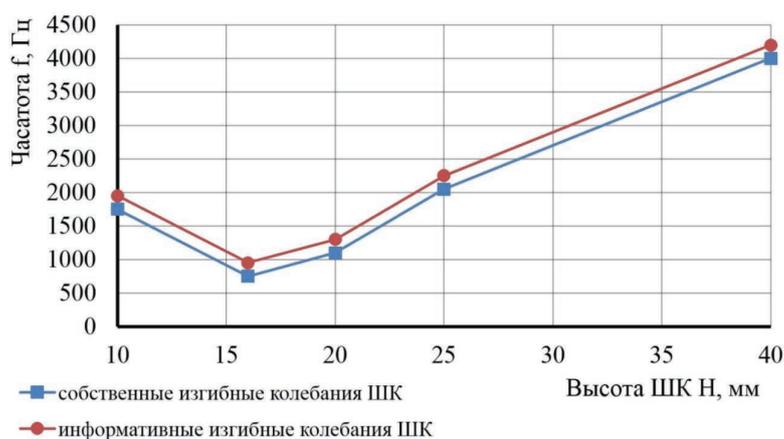


Рис. 3. Экспериментально полученные информативные и собственные частоты изгибных колебаний шлифовальных кругов прямого профиля  $250 \times H \times 76$  [23]

Fig. 3. Grinding wheels straight profile bending vibrations  $250 \times H \times 76$ : Informative frequencies and Natural frequencies obtained experimentally [23]

Этот вывод впоследствии подтвердился в работе Агафонова В.В. [24]. Авторы утверждают, что источником колебаний на информативной частоте является непосредственно шлифовальный круг. Исходя из этого объектом исследования является шлифовальный круг 1  $250 \times 32 \times 76$  25A F46 K 6 V 35 2700 об/мин ГОСТ Р 52781–2007. В качестве предмета выступает спектральный состав частот собственных колебаний шлифовальных кругов ШК 1 и ШК 2.

Для регистрации и обработки акустического сигнала и определения спектрального состава частот собственных колебаний шлифовальных кругов применяется измеритель частот собственных колебаний ИЧСК-2. Этот прибор предназначен для акустического контроля физико-механических свойств объектов и обнаружения дефектов изделий; при этом задействуется спектральный анализ акустического сигнала реакции объекта на тестовое воздействие. В частности, ИЧСК-2 обладает режимом для исследования шлифовальных кругов, позволяющим определять звуковой индекс (ЗИ) круга и на его основе делать заключение о степени твердости объекта в соответствии с ГОСТ Р 52710–2007. ЗИ определяется прибором на основании физико-механических свойств материала шлифовальных кругов, а также их геометрических параметров (табл. 1). Над каждым испытуемым объектом (ШК 1 и ШК 2) проведено по четыре опыта.

Таким образом, согласно данным, сведенным в табл. 1, были определены ЗИ шлифовальных кругов в соответствии с их физико-механическими и геометрическими параметрами.

### Экспериментальное исследование акустических сигналов при плоском шлифовании

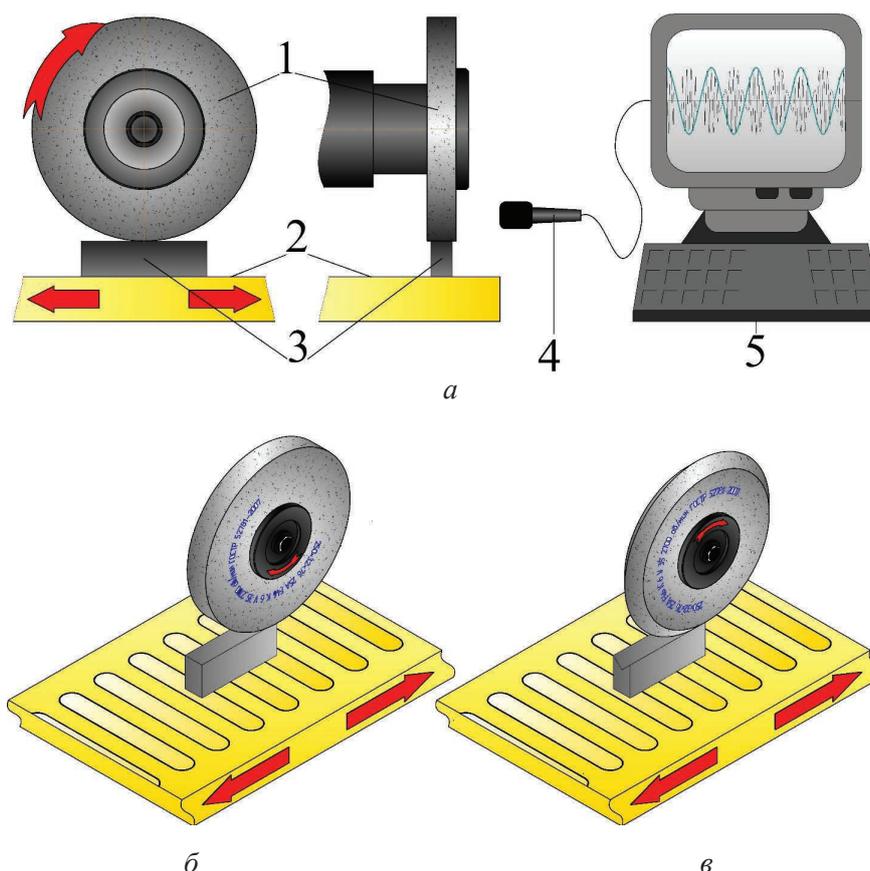
В этом разделе описано сравнительное экспериментальное исследование акустических сигналов в процессе плоского шлифования с применением кругов различных профилей. Объект исследования – процесс плоского маятникового шлифования; предмет – акустический сигнал, сопровождающий данный процесс.

Экспериментальная установка (рис. 4) смонтирована на базе универсального

**Параметры шлифовальных кругов, необходимые для определения звукового индекса прибором ИЧСК-2**

**Parameters of the grinding wheels required to determine the sound index**

Параметр / Parameter	ШК 1 / GW 1	ШК 2 / GW 2
Обозначение ШК / GW designation	1 250×32×76 25A F46 K 6 V 35 2700 об/мин ГОСТ Р 52781–2007	
Марка абразивного материала / Abrasive material type	Белый электрокорунд 25А / white electrocorundum 25A	
Размеры круга ( $D \times H \times d$ ), мм / GW dimensions ( $D \times H \times d$ ), mm	250×32×76	250×32×76
Коэффициент формы ШК ( $F$ ), $m^{-1}$ / GW shape factor ( $F$ ), $m^{-1}$	0,001175	0,001182
Масса ШК ( $m$ ), кг / GW mass ( $m$ ), kg	3,14	2,72
Плотность ШК ( $\rho$ ), $г/см^3$ / GW density ( $\rho$ ), $g/cm^3$	2,02	



*Рис. 4. Экспериментальная установка:*

*a* – общий вид; *б* – с применением ШК 1; *в* – с применением ШК 2;  
*1* – инструмент; *2* – магнитный стол; *3* – заготовка (образец); *4* – микрофон;  
*5* – персональный компьютер

*Fig. 4. Experimental setup:*

*a* – general view; *б* – using GW 1; *в* – using GW 2;  
*1* – tool; *2* – magnetic table;  
*3* – workpiece (sample); *4* – microphone; *5* – personal computer

плоскошлифовального станка высокой точности с горизонтальным шпинделем и прямоугольным столом модели ЗГ71М. Шлифуются образцы из углеродистой конструкционной стали 30, твердостью 37...41HRCэ в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами 140×25×30 мм. Периферией ШК 1 обрабатывается плоскость с размерами 140×25 мм; ШК 2 обрабатывается канавка треугольной формы углом 90° длиной 140 мм. Режимы шлифования представлены в табл. 2.

Шлифовальные круги перед началом обработки закрепляются в планшайбе, балансируются статическим способом, устанавливаются на шпиндель станка и подвергаются правке.

В задачу каждого отдельного опыта входит фиксирование (запись) сигнала акустических сигналов для установленных технологических условий.

Для регистрации акустического сигнала применялся бесконтактный датчик – компактный микрофон направленного действия, закрепленный в штатив на расстоянии 50...100 мм от торцевой поверхности инструмента. Аналоговый акустический сигнал, принимаемый микрофоном, подвергался оцифровке с помощью звуковой карты персонального компьютера. Используется звуковая карта типа WDM. В качестве программного обеспечения для работы с полученными акустическими данными использовалась программа «SOUNDFORGEPro 13.0».

Для оценки качества шлифованной поверхности измерялось среднее арифметическое

отклонение профиля образца ( $Ra$ , мкм). Для этого применялся профилометр контактный степени точности 1 по ГОСТ 19300–86 модели 130. Обработанные поверхности были условно разделены на пять равных участков, после чего внутри каждого произведено по пять замеров шероховатости по направлению продольной подачи стола  $V_s$  и перпендикулярно  $V_s$ . Длина базовой линии, по которой определялся микропрофиль поверхности образца, равна 4 мм.

Описанная методика представляет собой набор элементов методик, примененных в проводимых ранее исследованиях аналогичной направленности [23, 24]. Методика доработана и адаптирована с учетом цели исследования. Применяющееся оборудование, аппаратура и программное обеспечение соответствуют цели и задачам данной работы, позволяют определять значения необходимых параметров с достаточной точностью.

#### *Исследование акустического сигнала холостой работы экспериментальной установки*

В рамках настоящей работы следует отдельно отразить степень влияния «шумов», сопровождающих работу агрегатов станка и не несущих полезной для исследования информации. Даже в лабораторных условиях невозможно зарегистрировать отдельно акустический сигнал одного конкретного источника. Множество элементов системы станка при обработке вносят свой опре-

Таблица 2

Table 2

#### Режимы обработки

#### Processing modes

Режим / Mode	Значение / Value
Окружная скорость вращения круга $V_k$ , об/мин / Rotational speed of the GW $V_k$ , rpm	2700
Периодическая вертикальная подача $S_t$ на глубину $t$ , мм/дв.ход / Intermittent vertical feed $S_t$ to a depth of $t$ , mm/double stroke	0,01 / 0,015 / 0,02
Продольная подача стола (заготовки) $V_s$ , м/мин / Longitudinal feed of the table (workpiece) $V_s$ , m/min	5
Ширина шлифования $l_{ш}$ , мм / Grinding width $l_g$ , mm	25 / 34
Продолжительность обработки $T$ , мин / Processing time $T$ , min	15

деленный вклад в общую акустическую картину. Для того чтобы получить представление об этом вкладе, необходимо предварительное исследование акустических сигналов, сопровождающих холостую работу станка. При внедрении данного метода на реальное производство также будет необходимо исследовать вклад прочих источников шумовых сигналов.

В рамках данной работы разнообразные акустические сигналы, не несущие в себе информации о свойствах и состоянии инструмента, будем называть шумовыми помехами, или шумами; сигнал, генерируемый упругими колебаниями ШК в процессе обработки и изменяющийся в зависимости от степени его износа, – информативным (полезным) акустическим сигналом [23]. Проведен анализ спектра акустических колебаний основных элементов технологической системы, работа которых сопровождается шумовым фоном. Рассмотрен спектральный состав при последовательном включении систем: 1 – электропитания, 2 – гидростанции, 3 – вращения шпинделя и 4 – продольной подачи стола  $V_s$ .

### Результаты и их обсуждение

Раздел содержит описание полученных в ходе эксперимента результатов и их интерпретацию.

#### **Частоты собственных колебаний и звуковой индекс шлифовальных кругов разного профиля**

**Частоты собственных колебаний.** На рис. 5 и 6 показаны спектрограммы частот собственных колебаний для ШК 1 и ШК 2 соответственно. Прежде всего отметим, что несмотря на то, что материал, из которого состоят шлифовальные круги, и его физико-механические свойства идентичны, спектры распределения ЧСК имеют разный характер. Это позволяет утверждать, что форма круга оказывает серьезное влияние на характер возбуждаемых в нем упругих колебаний.

В работах [22, 23, 24] шлифовальный круг рассматривается как твердое упругое изотропное тело в форме диска с центральным отверстием (иногда как кольцевая пластина). Предлагаемый диск – это пластина круглой формы, толщина которой (высота круга  $H$ , мм) мала по сравнению с диаметром (диаметр круга  $D$ , мм), имеющая центральное осевое отверстие (посадочный диаметр  $d$ , мм).

Физически каждый эксцесс на спектрограммах (рис. 5 и 6) указывает частоту, с которой совершается колебание с определенной *модой* – пространственной конфигурацией колебаний точек шлифовального круга при ударном воздействии (ГОСТ Р ИСО 2041–2012). Из графиков видно, что для каждого круга характерно одновременное возникновение нескольких мод колебаний. Каждая из мод имеет свою форму, т. е. конфигурацию в пространстве, когда точки на его поверхностях находятся на максимальном расстоянии от положения равновесия (покоя). Доминирующие моды проявляются в высоких значениях уровня звука. Именно доминирующим модам за счет значительных отклонений микрообъемов тела от состояния равновесия характерен более мощный акустический сигнал, регистрируемый прибором неопределенной частоты. Моды, имеющие наименьшее значение частоты собственных колебаний, называются основной собственной модой. Так, для ШК 1 основная собственная мода вибрации  $f_{\text{осн1}} = 2062$  Гц, для ШК 2  $f_{\text{осн2}} = 2337$  Гц.

**Звуковой индекс.** Упругая акустическая волна, распространяющаяся в материале шлифовального круга, возбужденная вследствие ударного воздействия, имеет ряд определенных характеристик. В рамках нашего исследования показательными характеристиками выступают приведенная скорость ее распространения  $C_L$  и звуковой индекс. ЗИ является нормированным интегральным показателем, представляющим собой усредненное в определенном диапазоне значение  $C_L$ , предусмотренный стандартом ГОСТ Р 52710-2007 и применяющийся при акустическом контроле [25, 26]. Связь ЗИ с коэффициентом формы объекта, модулем Юнга ( $E$ -модулем) и плотностью материала делает его высокоинформативным параметром, позволяющим определять некоторые физико-механические свойства абразивных материалов, в частности, степень твердости.

Согласно параметрам исследуемых объектов (см. табл. 1) в результате проведенных испытаний установлены значения ЗИ для каждого из них. Звуковые индексы для ШК 1 и ШК 2 приняли одинаковые значения и составили 47 единиц, что соответствует степени твердости К по ГОСТ Р 52587–2006 (или СМ1 по ГОСТ 2424–83). Значения степени твердости совпадают с маркиров-

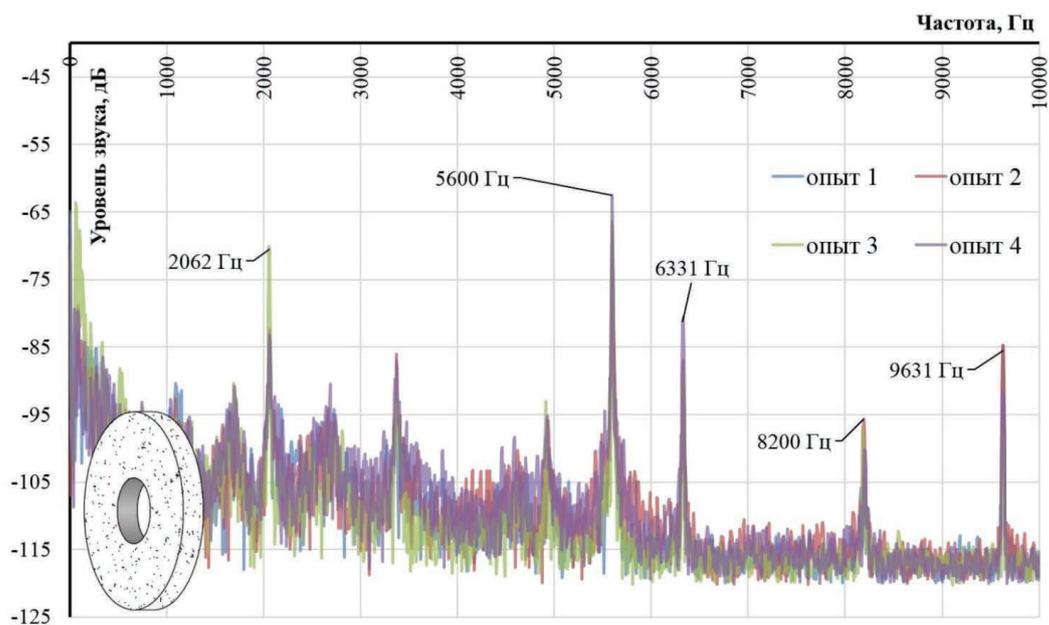


Рис. 5. Спектральный состав частот собственных колебаний ШК 1

Fig. 5. Spectral composition of GW 1 natural vibration frequencies

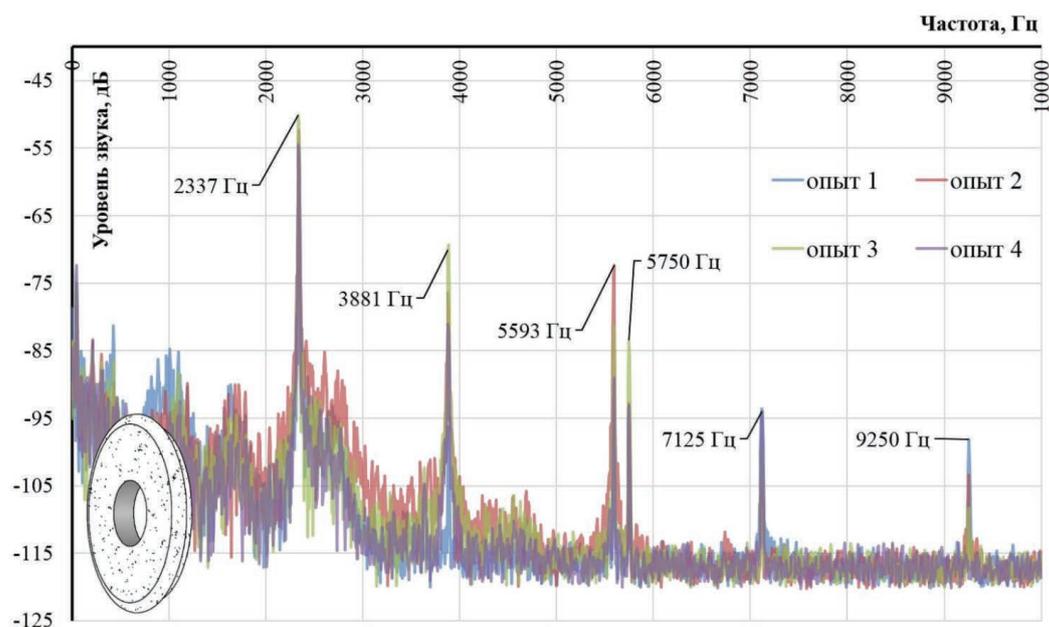


Рис. 6. Спектральный состав частот собственных колебаний ШК 2

Fig. 6. Spectral composition of GW 2 natural vibration frequencies

кой, установленной производителем. Значения приведенной скорости распространения акустической волны  $C_L$ , зарегистрированные прибором ИЧСК-2, попадают в диапазон 4600...4800 м/с.

По результатам измерений свойства материалов ШК 1 и ШК 2 не отличаются, что соответствует действительности. Отметим, что в данном случае изменение формы испытуемого ШК не повлияло на значение ЗИ, т.е. скорость распространения акустической волны  $C_L$  не из-

менилось, поскольку этот показатель зависит от физико-механических свойств материала, которые не претерпели изменений. Одновременно с этим зарегистрированы значительные изменения спектральной картины распределения ЧСК, что говорит о независимости параметров ЗИ и ЧСК.

Таким образом, установлено, что для исследованных кругов разной геометрической формы характерен различный спектральный состав соб-

ственных частот. На данном этапе исследований в этих различиях не прослеживается какой-либо закономерности.

### *Акустические сигналы, сопровождающие холостой режим работы плоскошлифовального станка модели 3Г71М*

Исследовался акустический сигнал, сопровождающий работу систем станка модели 3Г71М. С помощью микрофона регистрировались акустические сигналы, сопровождающие последовательное включение систем: 1 – электропитания, 2 – гидростанции, 3 – вращения шпинделя и 4 – продольной маятниковой подачи стола  $V_s$ . В табл. 3 представлены спектрограммы, отражающие распределение частот акустических колебаний для зарегистрированных сигналов. Так, на первом этапе зарегистрирован сигнал от работы только системы электропитания, на последнем – от всех перечисленных систем. Поскольку шлифование при проведении эксперимента осуществляется сухим способом, учет работы системы подачи СОЖ не потребовался.

Анализ спектра акустических колебаний элементов технологической системы (ТС) показал, что наибольший вклад в акустическую картину работы станка на холостом ходу вносит вращение шпинделя с шлифовальным кругом (табл. 3, (3)). Значительное повышение уровня звука в широком частотном диапазоне (от 2 до 7,5 кГц) произошло в среднем на 26 % (рис. 7) относительно этапа, на котором были задействованы системы электропитания и гидравлики. Это вызвано совместным действием отдельных узлов шлифовальной головки: электродвигателя шлифовального круга М3 (2,2 кВт, 2860 об/мин, 50 Гц, исполнение М101 с коробкой выводов КЗ МРТУ16–510.002–65 АОЛ2–22–2–С1); шкивов плоскоременной передачи; трехпорных подшипников; шпинделя; шлифовального круга.

Акустический сигнал, соответствующий работе гидравлической станции, нашёл отражение на интервале частот 250...650 Гц как стабильный эксцесс, наблюдаемый на каждой (кроме первой) из представленных спектрограмм. Уровень звука имеет пульсирующий во времени характер, что соответствует особенности работы масляного насоса, значение уровня звука составляет от –17 до –50 дБ.

Системы энергоснабжения и продольной подачи стола (табл. 3 (1), (4)) не генерируют значительных акустических возмущений элементов технологической системы, не вносят существенных изменений в общую акустическую картину холостой работы экспериментальной установки.

Важным фактом для дальнейшего исследования является устойчивый «провал», проявившийся на спектрограммах холостой работы в диапазоне 1900...2100 Гц. В дальнейшем при возникновении в указанном диапазоне новых обертонов можно утверждать, что их вызвало нечто не связанное со звуком холостой работы установки.

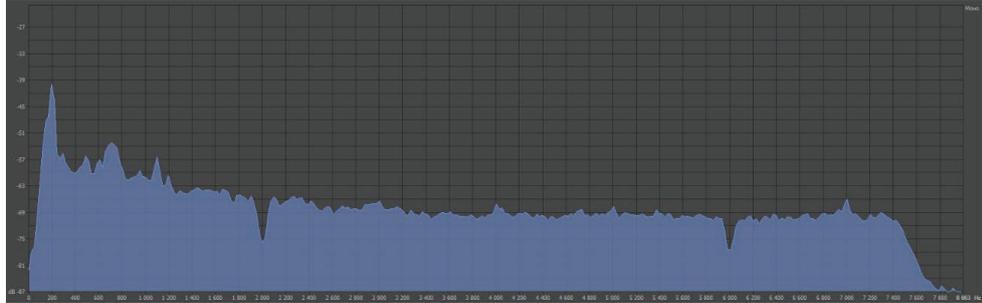
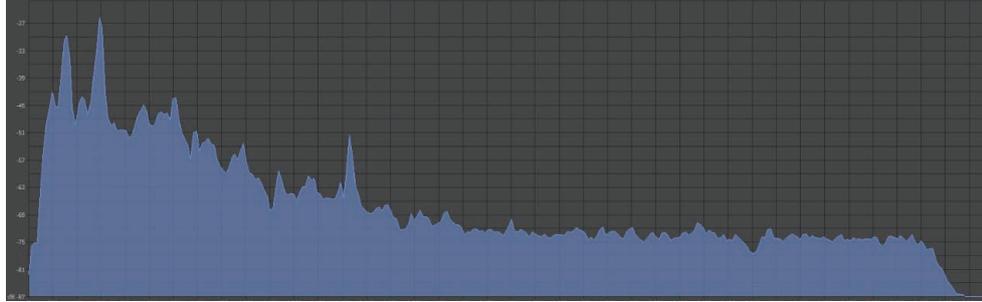
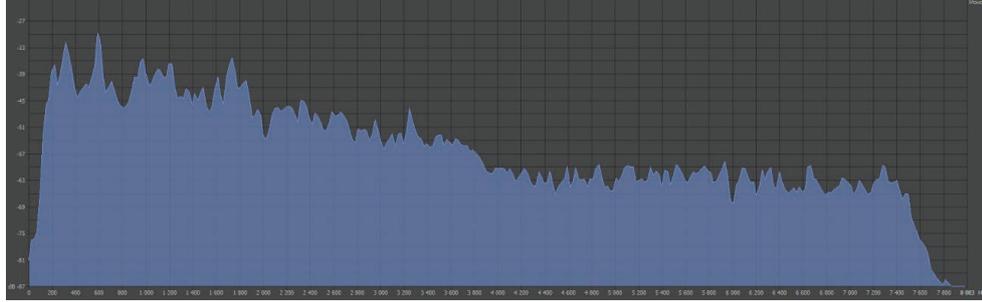
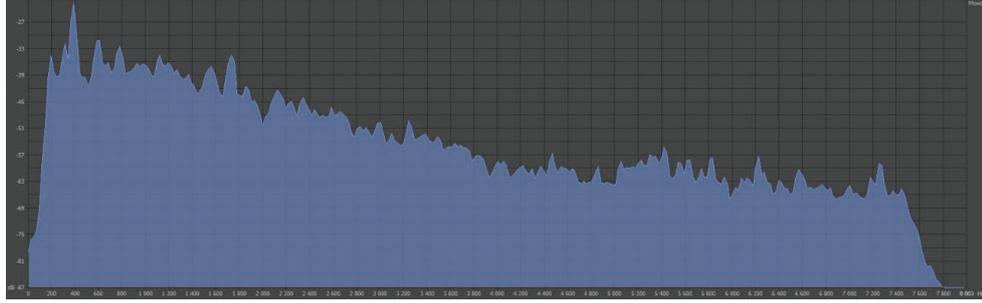
Таким образом, спектральный состав, представленный в табл. 3 (4), представляет собой относительно постоянный фоновый «шум», сопровождающий исследуемые процессы. Данный акустический компонент не следует учитывать при рассмотрении изменения состояния инструмента в процессе шлифования. В частности, постоянные эксцессы, присутствующие на спектрограммах (рис. 7–11) в диапазонах 550...650 и 2650...2700 Гц, определено связаны с работой насосов гидравлической системы. При этом следует понимать, что значительное повышение уровня звука в указанных пределах частот невозможно при штатном функционировании гидравлической системы.

### *Акустические сигналы, сопровождающие процесс обработки шлифовальными кругами разного профиля*

Испытуемые образцы шлифовались в течение 15 мин (900 с). Исследовалось влияние формы профиля ШК, значения периодической вертикальной подачи  $S_t$  на глубину  $t$ , а также продолжительности шлифования  $T$  на акустические явления, сопровождающие процесс обработки. Основные результаты исследования акустических сигналов представлены в виде спектрограмм распределения частот акустических колебаний для различных технологических условий и подлежащих сравнению.

Прежде всего отметим, что в высокочастотном диапазоне ( $> 8$  кГц) не наблюдается значительных и стабильных акустических эксцессов. Кроме того, анализ спектрограмм холостой работы установки показал возникновение значи-

Спектрограммы акустического сигнала систем станка 3Г71М  
Acoustic signal spectrograms of 3Г71М machine systems

Активная система / Active system	Спектрограмма / Spectrogram
(1) электропитание / (1) power supply	
+ (2) гидростанция / + (2) hydraulic power plant	
+ (3) вращение шпинделя / + (3) spindle rotation	
+ (4) продольная подача / + (4) longitudinal feed	

тельных эксцессов в низкочастотной области спектра ( $< 1000$  Гц). В связи с этим рассматриваются спектрограммы в диапазоне  $1 \dots 8$  кГц.

Спектрограммы начального этапа обработки (рис. 8 и 10) отличаются от спектрограммы холостой работы установкой проявлением новых эксцессов. Дополнительным источником акусти-

ческих колебаний здесь является только процесс шлифования (удаление припуска) заправленным кругом. Проявление данного процесса можно наблюдать на спектрограммах в виде увеличений амплитуды уровня звука в диапазоне  $1400 \dots 2000$  Гц для обработки с применением ШК 1 и в диапазоне  $1400 \dots 2400$  Гц для обработки с применением



Рис. 7. Спектрограмма акустического сигнала холостой работы основных систем экспериментальной установки

Fig. 7. Idle operation acoustic signal spectrogram of the experimental setup main systems

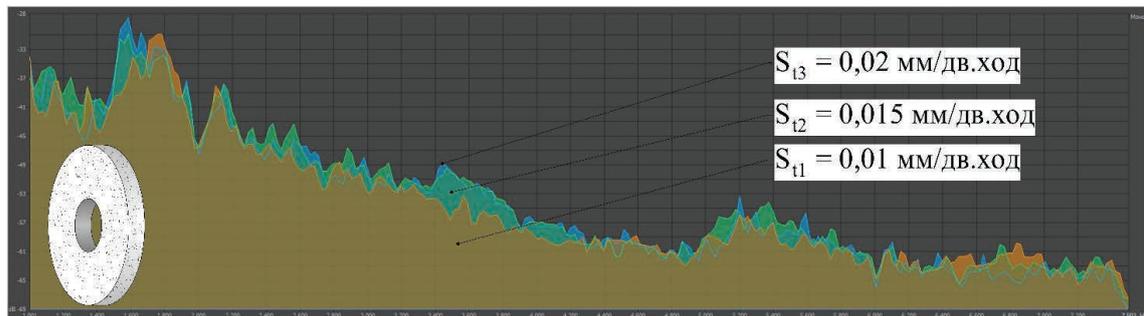


Рис. 8. Спектрограммы начального этапа обработки с применением ШК 1 и  $S_{t1} = 0,01$ ;  $S_{t2} = 0,015$ ;  $S_{t3} = 0,02$  мм/дв.ход

Fig. 8. Spectrograms of initial processing stage with use GW 1 and  $S_{t1} = 0.01$ ;  $S_{t2} = 0.015$ ;  $S_{t3} = 0.02$  mm/double stroke feeds

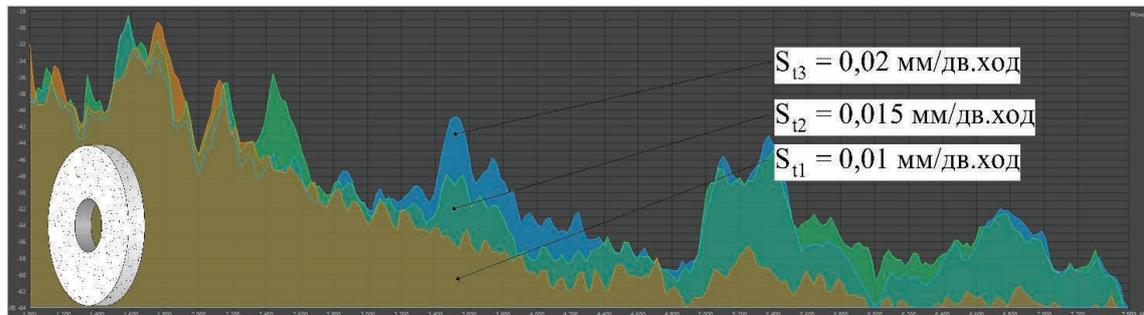


Рис. 9. Спектрограммы завершающего этапа обработки с применением ШК 1 и  $S_{t1} = 0,01$  мм/дв.ход;  $S_{t2} = 0,015$  мм/дв.ход;  $S_{t3} = 0,02$  мм/дв.ход

Fig. 9. Spectrograms of final processing stage with use GW 1 and  $S_{t1} = 0.01$ ;  $S_{t2} = 0.015$ ;  $S_{t3} = 0.02$  mm/double stroke

ШК 2, т. е. примененный акустический метод проявляет чувствительность к исследуемому процессу.

Начальному этапу также характерны достаточно слабые различия спектральных составов для разных значений периодической вертикальной подачи, особенно это относится к процессу с применением ШК 1. Обработка поверхностью

круга, которая сформирована алмазным карандашом в процессе правки, предполагает этап приработки. Данный этап может иметь разную продолжительность, которая зависит от величины периодической вертикальной подачи, но одинаковый механизм преобразования поверхности инструмента за счет удаления невыгодно ориентированных абразивных зерен.

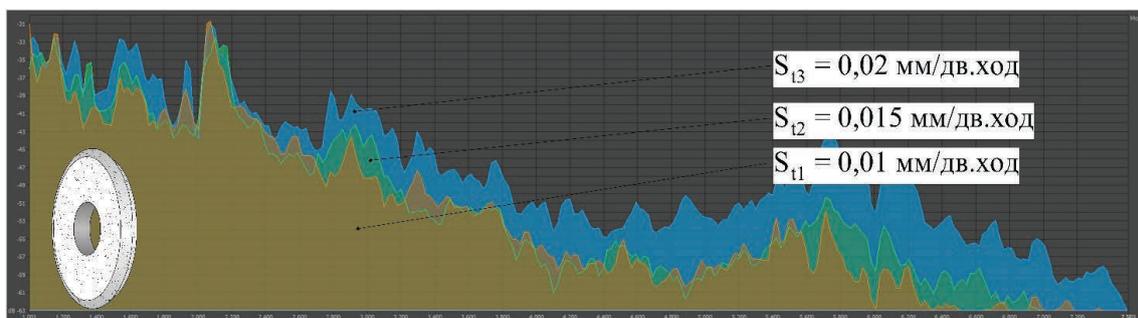


Рис. 10. Спектрограммы начального этапа обработки с применением ШК 2 и  $S_{t1} = 0,01$ ;  $S_{t2} = 0,015$ ;  $S_{t3} = 0,02$  мм/дв.ход

Fig. 10. Spectrograms of initial processing stage with use GW 2 and  $S_{t1} = 0.01$ ;  $S_{t2} = 0.015$ ;  $S_{t3} = 0.02$  mm/double stroke feeds

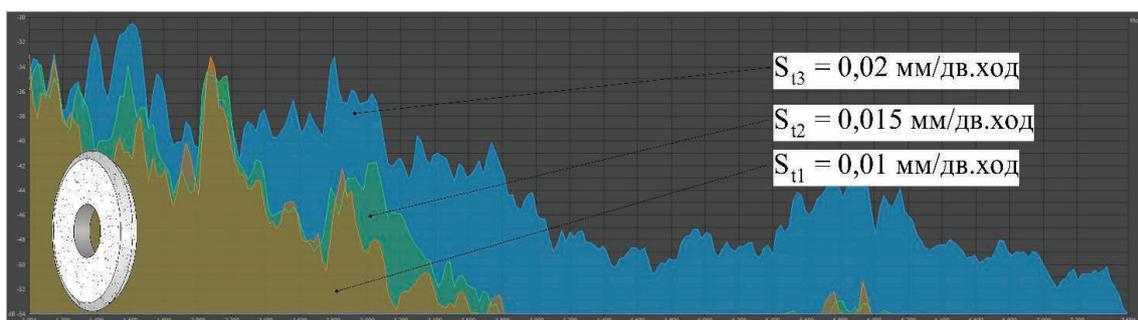


Рис. 11. Спектрограммы завершающего этапа обработки с применением ШК 2 и  $S_{t1} = 0,01$ ;  $S_{t2} = 0,015$ ;  $S_{t3} = 0,02$  мм/дв.ход

Fig. 11. Spectrograms of final processing stage with use GW 2 and  $S_{t1} = 0.01$ ;  $S_{t2} = 0.015$ ;  $S_{t3} = 0.02$  mm/double stroke

На завершающем этапе обработка осуществляется инструментом, утратившим первоначальные характеристики, со сниженной режущей способностью. Если этапу нормальной работы [27] соответствуют в основном истирание вершин абразивных зерен и поверхностное выкрашивание, то в рассматриваемый момент (аварийный этап) происходит уже объемное разрушение зерен и вырывание их из связки. Интенсивно возрастающий износ инструмента и снижение его режущей способности имеет следующие проявления на спектрограммах завершающего этапа обработки (рис. 9 и 11). Видно, что произошли значительные увеличения амплитуды уровня звука в широком диапазоне частот. Наиболее ярко это проявляется при шлифовании на более жестких режимах ( $S_{t2}$ ,  $S_{t3}$ ). Для малых значений  $S_t$  ( $S_{t1}$ ) рост амплитуды уровня звука также имеет место, однако проявлен значительно слабее.

Для завершающего этапа обработки с применением ШК 1 наиболее характерными диа-

пазонами частот, содержащими значительные приросты амплитуды уровня звука, являются:  $2150 \pm 150$  Гц,  $3500 \pm 300$  Гц,  $4900 \dots 5500$  Гц и  $6750 \pm 200$  Гц. В аналогичном отношении перечислим диапазоны частот, свойственные завершающему этапу обработки с применением ШК 2:  $2070 \pm 200$  Гц;  $2750 \pm 250$  Гц;  $5500 \dots 6150$  Гц.

Таким образом, вследствие отличий спектральных составов акустических колебаний и отсутствия других факторов, способных внести в них значительные изменения, можно утверждать, что форма шлифовального круга значительно влияет на спектральный состав акустических колебаний, возникающих при обработке. Кроме того, изменения режущей способности инструмента, происходящие в ходе протекания процесса шлифования, также находят отражение на спектрограммах акустики процесса.

Далее предлагается сравнение распределений частот акустических сигналов, полученных при исследовании ЧСК кругов и при исследовании процесса шлифования. Для этого в одной

системе координат в упрощенном виде разместим графики ЧСК (рис. 5, 6) и спектрограммы процесса шлифования на завершающем этапе обработки (рис. 9, 11), проведем визуальное сравнение (рис. 12).

Выделим основные интервалы частот, содержащие значительные эксцессы, развивающиеся по мере обработки. При этом необходимо учитывать шумы, сопровождающие работу узлов экспериментальной установки. На рис. 12 схематично представлено сравнение ЧСК шлифовальных кругов и частот акустических сигналов, записанных в процессе шлифования.

Доминирующими частотами собственных колебаний шлифовальных кругов являются 2062 и 2337 Гц соответственно для ШК 1 и ШК 2. Именно эти частоты колебаний использовались при расчете скорости распространения звуковой волны  $C_L$  и определения звукового индекса. Из схемы, рис. 12, видно, что полного совпадения собственных частот колебаний шлифовального круга с частотами акустических сигналов при шлифровании, как утверждается в работе В.С. Юганова [23], не наблюдается. Однако имеются достаточно близкие значения

этих частот. Наиболее близкие значения частот наблюдаются при рассмотрении ЧСК ШК 1 и частот при шлифовании кругом прямого профиля: 2062 и 2150 Гц соответственно. При аналогичном сравнении ШК 2 разница частот более существенная: собственные колебания – 2337 Гц и процесс шлифования – 2070 Гц. Таким образом, подтверждается, что источником акустического сигнала при шлифовании выступает шлифовальный круг. Информативными частотами для процессов с использованием ШК 1 и ШК 2 являются соответственно:  $f_{ШК1} = 2050...2250$  Гц;  $(2150 \pm 100)$  Гц;  $f_{ШК2} = 1970...2170$  Гц  $(2070 \pm 100)$  Гц).

В результате установлено, что при исследовании взаимосвязи между акустическими характеристиками процесса шлифования и режущей способностью инструмента для различных технологических условий (профиль инструмента, значение периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  и продолжительность обработки) целесообразно принимать во внимание значение доминирующих частот собственных колебаний используемых шлифовальных кругов, так как по ним можно определять значения информативных частот.

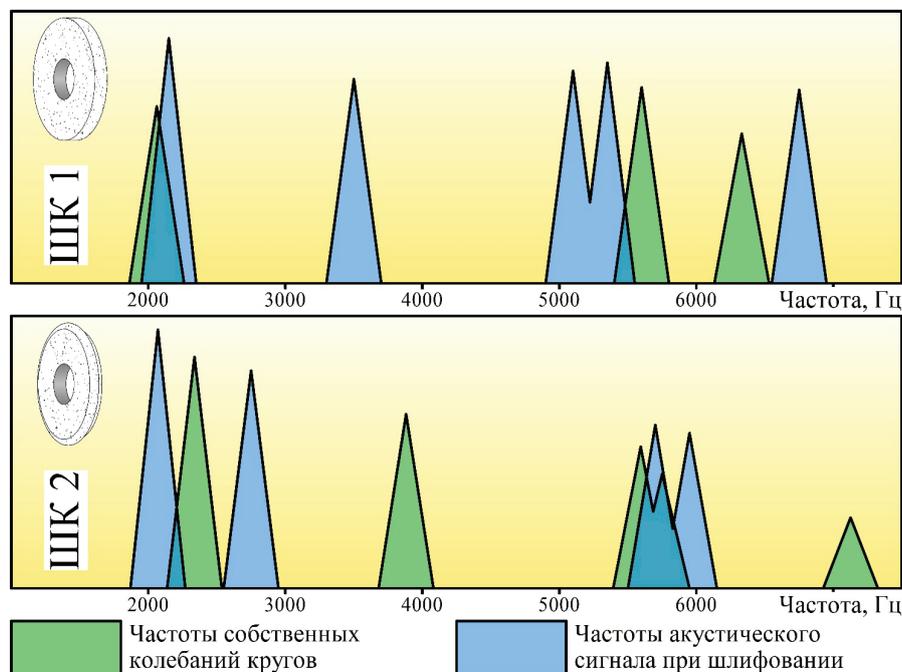


Рис. 12. Схема сравнения частот собственных колебаний шлифовальных кругов и частот акустического сигнала шлифования

Fig. 12. Comparison scheme of grinding wheels natural vibrations frequencies and frequencies of acoustic grinding signal

### Математическое моделирование параметра уровня звука при шлифовании инструментом различного профиля

На основании данных о динамике акустического сигнала в процессе шлифования возможна разработка *регрессионных моделей*, описывающих зависимость уровня звука ( $\beta$ , дБ) от продолжительности обработки ( $T$ , мин) и значения периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  ( $S_p$ , мм/дв.ход) для каждого из исследуемых кругов:

$$\beta_{\text{ШК1}} = -38,6 + 128,7S_p + 0,096T; \quad (2)$$

$$\beta_{\text{ШК2}} = -36,05 + 75,9S_p + 0,29T. \quad (3)$$

Статистическая значимость уравнений проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Для уравнения (2) коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0,46$ ; для уравнения (3)  $R^2 = 0,63$ . Расчетное значение критерия Фишера для уравнения (2)  $F_{\text{ШК1}} = 36,5$ ; для уравнения (3)  $F_{\text{ШК2}} = 73,4$ . Табличные значения критерия для уравнений совпадают, поскольку при статистической обработке имеют равное число степеней свободы  $F_{\text{табл}} = 3,07$ . И поскольку в обоих случаях фактическое значение  $F$ -критерия Фишера значительно превышает критическое (табличное), то можно заключить, что коэффициенты детерминации статистически значимы и уравнения регрессии статистически надежны, коэффициенты при  $S_p$  и  $t$  совместно значимы.

Математические модели (2) и (3) описывают зависимость акустического параметра – уровня звука определенной частоты от значения периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  и продолжительности обработки. Модели имеют как сходство, так и серьезные различия. Их анализ показал, что величина периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  ( $S_p$ , мм/дв.ход) имеет большее влияние на показание уровня звука (аналогично с [28]) по сравнению с продолжительностью обработки ( $T$ , мин). При этом для уравнения (3) фактор продолжительности обработки имеет более серьезное значение, чем для уравнения (2). Таким образом, продолжительность обработки кругом ШК 2 в большей степени влияет на уровень звука, чем продолжительность обработки кругом ШК 1.

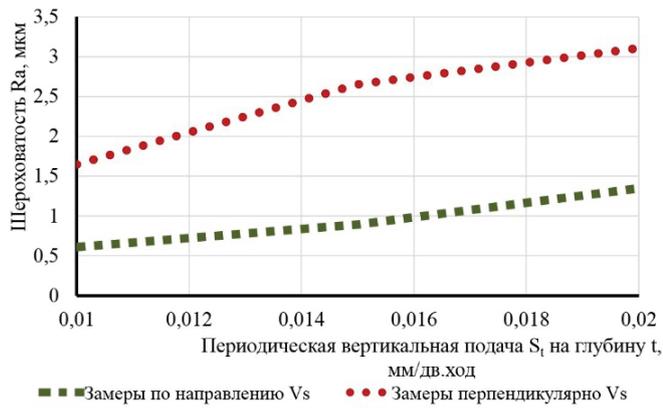
Прикладное значение разработанных моделей заключается в возможности прогнозирования уровня звука для мониторинга текущего состояния режущей способности инструмента в диапазонах  $S_p$  от 0,01 до 0,02 мм/дв.ход и продолжительности обработки от 0 до 15 мин. Корректное использование полученных математических моделей для определения акустических параметров (амплитуды уровня звука) возможно лишь в случае соответствия информативных частот, для которых данные модели были разработаны.

*Исследование шероховатости.* Исследование шероховатости заготовок проводилось в конце цикла обработки продолжительностью 15 мин. Полученные результаты измерений представлены на графиках, изображенных на рис. 13. Установлена зависимость значений среднего арифметического отклонения профиля образцов ( $Ra$ , мкм) от фактора периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  ( $S_p$ , мм/дв.ход).

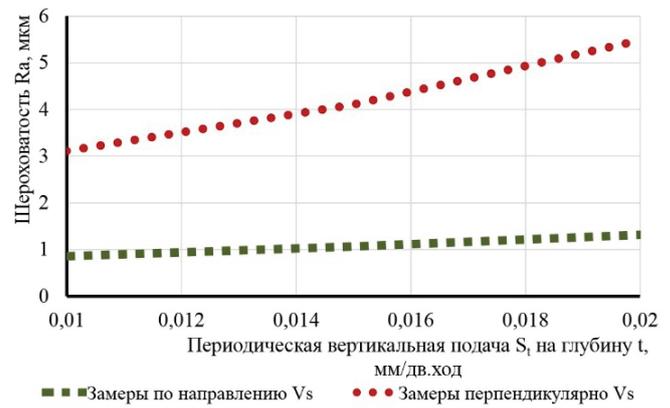
Из графиков видно, что шероховатость поверхности, сформированной профильным кругом ШК 2, всегда значительно грубее по сравнению с обработкой с применением ШК 1. Так, замеры по направлению продольной подачи  $V_S$  отличаются на 20 %; замеры, проведенные перпендикулярно направлению  $V_S$  отличаются на 70 %. Заметен также тренд к увеличению значений шероховатости по мере увеличения периодической вертикальной подачи на глубину  $t$ . При этом для замеров, проведенных по направлению  $V_S$ , значения для ШК 2 хоть и превышают значения для ШК 1, но возрастают медленнее (меньше зависят от  $S_p$ ). Значение шероховатости, полученное для  $S_{p1} = 0,01$  мм/дв.ход, отличается от значения, полученного для  $S_{p3} = 0,02$  мм/дв.ход, в 2,3 раза для ШК 1 и в 1,6 раза для ШК 2.

Поскольку с применением ШК 2 площадь пятна контакта инструмента с заготовкой увеличивается (на 35 %), поэтому процесс обработки требует большего расхода мощности, что согласуется с выводами Ермолаева В.К. [29]. Более жесткие условия обработки, реализуемые на том же оборудовании, в результате привели к ухудшению качества обработанной поверхности.

*Направление для дальнейших исследований.* Акустический метод, положительно зарекомендовавший себя на многих видах обработки, потенциально способен обеспечить качественную информационную поддержку при достаточном



а



б

Рис. 13. Зависимость шероховатости от значения периодической вертикальной подачи  $S_1$  на глубину  $t$ :

а – для ШК 1; б – для ШК 2

Fig. 13. Dependence of roughness on the value of periodic vertical feed  $S_1$  at depth  $t$ :

а – for the GW 1; б – for the GW 2

его исследовании. Следовательно, выявление особенностей акустических характеристик, свойственных процессу профильного шлифования, установление зависимости между ними и степенью износа ШК сделает возможным определение текущего состояния инструмента и откроет пути для корректировки режимов шлифования в соответствии с требованиями к качеству продукции.

Основным направлением дальнейших исследований в рамках обозначенной темы является модернизация полученных математических моделей, расширение области их практической применимости.

Для установления достоверной связи между косвенными акустическими параметрами процесса профильного шлифования и характеристиками качества обрабатываемой поверхности необходимо проведение дополнительных исследований динамики изменения микро- и макротопографии поверхности шлифуемых заготовок во времени. Степень прикладной значимости зависит от разнообразия факторов эксперимента и соответственно возможности использования моделей в более широком диапазоне технологических условий. Среди таких условий прежде всего необходимо уделить внимание технологическим схемам и режимам шлифования; геометрическим параметрам профилей ШК и характеристикам ШК; материалу обрабатываемых заготовок. При выборе факторов, влияющих на исследуемые акустические параметры и харак-

теристики качества, необходимо исходить из существующих производственных потребностей.

Важным этапом настоящей работы является определение информативных частот с использованием анализа частот собственных колебаний кругов. Поскольку примененный метод показал близкие значения ЧСК и информативных частот акустического сигнала при шлифовании, целесообразно будет продолжить исследования в данном направлении применительно к шлифовальным кругам другой геометрии.

Итоговый результат планируемого исследования будет состоять в разработке методических рекомендаций по выбору рациональной технологии обработки партии деталей в зависимости от объема и требований к качеству на основе характеристик акустического сигнала.

## Выводы

В рамках работы проведено исследование профильного шлифования акустическим методом. Определен информативный акустический диапазон, связанный с изменением состояния шлифовального круга по мере протекания процесса обработки. Из этого следует, что цель работы достигнута. Приведем основные выводы исследования.

1. Характер спектрального состава частот собственных колебаний шлифовального круга зависит от его формы. Имеют место значительные различия в спектрограммах ЧСК для объ-

ектов разной формы. В свою очередь, звуковой индекс, определенный эмпирическим способом, показал отсутствие зависимости от формы объектов, так как является показателем физико-механических свойств.

2. Исследование акустического сигнала, сопровождающего работу экспериментальной установки на холостом ходу, показал, что наиболее значительный вклад в акустическую картину вносит вращение шпинделя с шлифовальным кругом. Кроме того, установлено влияние гидравлической системы на акустический сигнал в низкочастотном акустическом диапазоне ( $< 1000$  Гц). Вследствие этого установлена целесообразность исследования спектрограмм акустического сигнала шлифования в диапазоне от 1 до 8 кГц.

3. Выявлены частотные диапазоны, в рамках которых происходит рост амплитуды уровня звука при шлифовании с применением ШК 1 и ШК 2. Такими диапазонами являются:

– для ШК 1 – 2000...2300 Гц; 3200...3800 Гц; 4900...5500 Гц; 6550...6950 Гц;

– для ШК 2 – 1870...2270 Гц; 2500...3000 Гц; 5500...6150 Гц.

Выявлены информативные частотные диапазоны:  $f_{ШК1} = 2050...2250$  Гц; ( $2150 \pm 100$  Гц);  $f_{ШК2} = 1970...2170$  Гц ( $2070 \pm 100$  Гц). Показана зависимость ЧСК и акустических сигналов при шлифовании. Предварительная оценка ЧСК позволяет определять информативные частоты акустического сигнала шлифования с применением кругов разного профиля.

4. С помощью регрессионного анализа акустических данных разработаны математические модели зависимости уровня звука ( $\beta$ , дБ) от значения периодической вертикальной подачи на глубину  $t$  ( $S_p$ , мм/дв.ход) и продолжительности обработки ( $T$ , мин) для рассмотренных инструментов:

$$\beta_{ШК1} = -38,6 + 128,7S_p + 0,096T;$$

$$\beta_{ШК2} = -36,05 + 75,9S_p + 0,29T.$$

Установлено, что уровень звука может выступать косвенным критерием для определения текущего состояния шлифовального круга в процессе обработки, позволяющим поддерживать заданные требования качества обрабатываемых деталей.

## Список литературы

1. Zhou C., Guo K., Sun J. Sound singularity analysis for milling tool condition monitoring towards sustainable manufacturing // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2021. – Vol. 157. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107738.

2. Boaron A., Weingaertner W.L. Dynamic in-process characterization method based on acoustic emission for topographic assessment of conventional grinding wheels // *Wear*. – 2018. – Vol. 406–407. – P. 218–229. – DOI: 10.1016/j.wear.2018.04.009.

3. Gholizadeh S., Leman Z., Baharudin B.T.H.T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering // *Structural Engineering and Mechanics*. – 2015. – Vol. 54, iss. 6. – P. 1075–1095. – DOI: 10.12989/sem.2015.54.6.1075.

4. Lu Z.-J., Xiang Q., Xu L. An application case study on multi-sensor data fusion system for intelligent process monitoring // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – P. 721–725. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.122.

5. Grinding burn detection based on cross wavelet and wavelet coherence analysis by acoustic emission signal / Z. Gao, J. Lin, X. Wang, Y. Liao // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 32, iss. 68. – P. 1–10. – DOI: 10.1186/s10033-019-0384-0.

6. An intelligent system for grinding wheel condition monitoring based on machining sound and deep learning / C.H. Lee, J.S. Jwo, H.Y. Hsieh, C.S. Lin // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 58279–58289. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982800.

7. Evaluation of grinding wheel surface by means of grinding sound discrimination / A. Hosokawa, K. Mashimo, K. Yamada, T. Ueda // *JSME International Journal. Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*. – 2004. – Vol. 47, iss. 1. – P. 52–58.

8. Comprehensive investigation on sound generation mechanisms during machining for monitoring purpose / R. Nourizadeh, S.M. Rezaei, M. Zareinejad, H. Adibi // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 121, iss. 1. – P. 1598–1610. – DOI: 10.1007/s00170-022-09333-7.

9. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – Vol. 42. – P. 157–165.

10. The use of wavelet transform to evaluate the sensitivity of AE attributes to variation of cutting parameters in milling aluminium alloys / R. Asadi, M.J. Anahid, H. Heydarnia, H. Mehmanparast, S.A. Niknam // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 1. – P. 1–14. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-1054589/v1.

11. Tool wear monitoring in micromilling using support vector machine with vibration and sound sensors / M.C. Gomes, L.C. Brito, M.B. da Silva, M.A.V. Duarte // *Precision Engineering*. – 2021. – Vol. 67. – P. 137–151. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.09.025.
12. Acoustic emission signal source separation for a flank wear estimation of drilling tools / F. Klocke, B. Döbeler, T. Pullen, T. Bergs // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 79. – P. 57–62. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.011.
13. Liu C.S., Ou Y.J. Grinding wheel loading evaluation by using acoustic emission signals and digital image processing // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – P. 1–13. – DOI: 10.3390/s20154092.
14. Deep convolutional neural network-based in-process tool condition monitoring in abrasive belt grinding / C. Cheng, J. Li, Y. Liu, M. Nie, W. Wang // *Computers in Industry*. – 2019. – Vol. 106. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.compind.2018.12.002.
15. Correlation between surface roughness and AE signals in ceramic grinding based on spectral analysis / M.A.A. Viera, F.A. Alexandre, P.R. Aguiar, R.B. Silva, E.C. Bianchi // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 249. – P. 1–5. – DOI: 10.1051/mateconf/2018249030.
16. Diamond wheel grinding characteristics of 3D-orthogonal quartz fiber reinforced silica ceramic matrix composite / B. Lin, H. Wang, J. Wei, T. Sui // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2020. – Vol. 34, iss. 5. – P. 404–414. – DOI: 10.1016/j.cja.2020.12.026.
17. Tool wear monitoring by ensemble learning and sensor fusion using power, sound, vibration, and AE signals / V. Nasir, S. Dibaji, K. Alaswad, J. Cool // *Manufacturing Letters*. – 2021. – Vol. 30. – P. 32–38. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2021.10.002.
18. Tool wear behavior of vitrified microcrystalline alu-mina wheels in creep feed profile grinding of turbine blade root of single crystal nickel-based superalloy / Q. Miao, W. Ding, W. Kuang, J. Xu // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 145. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106144.
19. Methodology for the immediate detection and treatment of wheel wear in contour grinding / L. Xu, M. Niu, D. Zhao, N. Xing, F. Fan // *Precision Engineering*. – 2019. – Vol. 60. – P. 405–412. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.09.006.
20. Agnard S., Liu Z., Hazel B. Material removal and wheel wear models for robotic grinding wheel profiling // *Procedia Manufacturing*. – 2015. – Vol. 2. – P. 35–40. – DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.007.
21. Гурьянихин В.Ф. Разработка средств текущего контроля и управления процессами шлифования и правки по интенсивности звукового излучения // *Вопросы технологии машиностроения: материалы выездного заседания Головного совета «Машиностроение» МО РФ*. – Ульяновск, 2003. – С. 67–72.
22. Глаговский Б.А. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 203 с.
23. Юганов В.С. Использование низкочастотных акустических колебаний для текущего контроля процесса шлифования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Ульяновск, 1999. – 198 с.
24. Агафонов В.В. Повышение эффективности круглого наружного врезного шлифования путем управления скоростью подачи по интенсивности звукового сигнала: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Ульяновск, 2010. – 181 с.
25. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Звуковой индекс – критерий оценки характеристик абразивных инструментов // *Труды конференции “Intergrind 88”*. – Будапешт, 1988. – Т. 1. – С. 45–52.
26. Коварская Е.З., Московенко И.Б., Павлов И.В. Контроль качества и физико-механических свойств твердых и сверхтвердых материалов по звуковому индексу // *Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сборник статей 7-й Международной научно-технической конференции*. – Могилев, 2020. – С. 82–92.
27. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с.
28. Ардашев Д.В., Жуков А.С. Экспериментальное исследование взаимосвязи виброакустических параметров процесса шлифования с показателями макронеровности обработанной поверхности // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 6–19. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-6-19.
29. Ермолаев В.К. Развитие профильного шлифования // *Ритм машиностроения*. – 2019. – № 4. – С. 40–48.

## Конфликт интересов

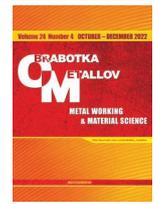
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Investigation of the relationship between the cutting ability of the tool and the acoustic signal parameters during profile grinding

Dmitrii Ardashev <sup>a</sup>, Alexander Zhukov <sup>b, \*</sup>

South Ural State University, 76 Prospekt Lenina, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>,  [ardashevdv@susu.ru](mailto:ardashevdv@susu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9328-7148>,  [zhukovas@susu.ru](mailto:zhukovas@susu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 30 August 2022

Revised: 06 September 2022

Accepted: 21 September 2022

Available online: 15 December 2022

#### Keywords:

Profile grinding,  
 Profiled grinding wheel  
 Actual cutting ability  
 Acoustic signal analysis  
 Spectral composition  
 Natural frequency  
 Informative frequency  
 Sound index

#### Funding

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

### ABSTRACT

**Introduction.** Modern mechanical engineering is closely connected with digital production management technologies, for which an important aspect is the collection of reliable information about the current state of the systems. Acoustic methods of current control of the tool cutting ability possess significant potential due to the possibility of continuously obtaining up-to-date data on the parameters of machining process. Profile grinding is one of the widespread methods of machining surfaces of complex configuration. The high importance of this method lies in the high degree of responsibility of shaped parts obtained with it. The wear parameter of profiled grinding wheels needs current control to the same extent as other types of cutting tools. At the same time, acoustic methods of research have not found wide application in relation to profile grinding. In view of this, the present work is aimed at studying the influence of the tool wear rate on the acoustic characteristics of grinding when using grinding wheels of different profiles. **Purpose of work** is to determine the acoustic parameters of profile grinding with application of planar grinding scheme as it wears out in comparison with analogical process with application of straight profile grinding wheel. As the basic **methods of research** an experiment is used to study the acoustic phenomena accompanying grinding with application of wheels of different profile. An analysis of the acoustic signal of grinding is carried out, as well as an analysis of the spectrum of its frequency composition. The frequencies of natural vibrations of grinding wheels of different profiles are investigated, its sound index is determined as a criterion for evaluating its characteristics. Acoustic characteristics of the grinding process with the use of grinding wheels of different profiles are compared. Regression analysis of acoustic data obtained as a result of the experiment is also used. **Results and discussion.** Spectrograms of frequencies of natural vibrations of the wheels under research, as well as a number of spectrograms of the acoustic signal accompanying the processing process for various technological conditions are received. As a result of comparing the obtained spectrograms, the informative frequencies of the grinding processes are determined. Mathematical models of sound level dependence on the value of periodic vertical feed  $S_f$  at depth  $t$  and processing time  $T$  are developed. It is established that the value of periodic vertical feed  $S_f$  at depth  $t$  has a greater influence on the acoustic index in comparison with the machining duration  $T$ . Practical significance and prospects of the results of the work lies in the possibility of increasing the efficiency of profile grinding processes due to the rational use of the tool availability.

**For citation:** Ardashev D.V., Zhukov A.S. Investigation of the relationship between the cutting ability of the tool and the acoustic signal parameters during profile grinding. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 64–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-64-83. (In Russian).

### References

1. Zhou C., Guo K., Sun J. Sound singularity analysis for milling tool condition monitoring towards sustainable manufacturing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 157, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107738.
2. Boaron A., Weingaertner W.L. Dynamic in-process characterization method based on acoustic emission for topographic assessment of conventional grinding wheels. *Wear*, 2018, vol. 406–407, pp. 218–229. DOI: 10.1016/j.wear.2018.04.009.

#### \* Corresponding author

Zhukov Alexander S., Post-graduate student

South Ural State University,

76 Prospekt Lenina,

454080, Chelyabinsk, Russian Federation

Tel.: 8 (351) 272-32-94, e-mail: [zhukovas@susu.ru](mailto:zhukovas@susu.ru)

3. Gholizadeh S., Leman Z., Baharudin B.T.H.T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Structural Engineering and Mechanics*, 2015, vol. 54, iss. 6, pp. 1075–1095. DOI: 10.12989/sem.2015.54.6.1075.
4. Lu Z.-J., Xiang Q., Xu L. An application case study on multi-sensor data fusion system for intelligent process monitoring. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 721–725. DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.122.
5. Gao Z., Lin J., Wang X., Liao Y. Grinding burn detection based on cross wavelet and wavelet coherence analysis by acoustic emission signal. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 32, iss. 68, pp. 1–10. DOI: 10.1186/s10033-019-0384-0.
6. Lee C.H., Jwo J.S., Hsieh H.Y., Lin C.S. An intelligent system for grinding wheel condition monitoring based on machining sound and deep learning. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 58279–58289. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982800.
7. Hosokawa A., Mashimo K., Yamada K., Ueda T. Evaluation of grinding wheel surface by means of grinding sound discrimination. *JSME International Journal. Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 2004, vol. 47, iss. 1, pp. 52–58.
8. Nourizadeh R., Rezaei S.M., Zareinejad M., Adibi H. Comprehensive investigation on sound generation mechanisms during machining for monitoring purpose. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121, iss. 1, pp. 1598–1610. DOI: 10.1007/s00170-022-09333-7.
9. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, pp. 157–165.
10. Asadi R., Anahid M.J., Heydarnia H., Mehmanparast H., Niknam S.A. The use of wavelet transform to evaluate the sensitivity of AE attributes to variation of cutting parameters in milling aluminium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 1, pp. 1–14. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1054589/v1.
11. Gomes M.C., Brito L.C., Silva M. B. da, Duarte M.A.V. Tool wear monitoring in micromilling using support vector machine with vibration and sound sensors. *Precision Engineering*, 2021, vol. 67, pp. 137–151. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.09.025.
12. Klocke F., Dobbeler B., Pullen T., Bergs T. Acoustic emission signal source separation for a flank wear estimation of drilling tools. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 79, pp. 57–62. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.011.
13. Liu C.S., Ou Y.J. Grinding wheel loading evaluation by using acoustic emission signals and digital image processing. *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 1–13. DOI: 10.3390/s20154092.
14. Cheng C., Li J., Liu Y., Nie M., Wang W. Deep convolutional neural network-based in-process tool condition monitoring in abrasive belt grinding. *Computers in Industry*, 2019, vol. 106, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.compind.2018.12.002.
15. Viera M.A.A., Alexandre F.A., Aguiar P.R., Silva R.B., Bianchi E.C. Correlation between surface roughness and AE signals in ceramic grinding based on spectral analysis. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 249, pp. 1–5. DOI: 10.1051/mateconf/2018249030.
16. Lin B., Wang H., Wei J., Sui T. Diamond wheel grinding characteristics of 3D-orthogonal quartz fiber reinforced silica ceramic matrix composite. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, vol. 34, iss. 5, pp. 404–414. DOI: 10.1016/j.cja.2020.12.026.
17. Nasir V., Dibaji S., Alaswad K., Cool J. Tool wear monitoring by ensemble learning and sensor fusion using power, sound, vibration, and AE signals. *Manufacturing Letters*, 2021, vol. 30, pp. 32–38. DOI: 10.1016/j.mfglet.2021.10.002.
18. Miao Q., Ding W., Kuang W., Xu J. Tool wear behavior of vitrified microcrystalline alumina wheels in creep feed profile grinding of turbine blade root of single crystal nickel-based superalloy. *Tribology International*, 2020, vol. 145, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106144.
19. Xu L., Niu M., Zhao D., Xing N., Fan F. Methodology for the immediate detection and treatment of wheel wear in contour grinding. *Precision Engineering*, 2019, vol. 60, pp. 405–412. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.09.006.
20. Agnard S., Liu Z., Hazel B. Material removal and wheel wear models for robotic grinding wheel profiling. *Procedia Manufacturing*, 2015, vol. 2, pp. 35–40. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.007.
21. Gur'yankhin V.F. [Development of tools for current monitoring and control of grinding and dressing processes by the intensity of sound emission]. *Voprosy tekhnologii mashinostroeniya* [Problems of Mechanical Engineering Technology]. Proceedings of a visiting meeting of the Head Council “Mechanical Engineering” of the Ministry of Education of the Russian Federation. Ulyanovsk, 2003, pp. 67–72. (In Russian).
22. Glagovskii B.A. *Nizkochastotnye akusticheskie metody kontrolya v mashinostroenii* [Low-frequency acoustic control methods in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 203 p.



23. Yuganov V.S. *Ispol'zovanie nizkochastotnykh akusticheskikh kolebanii dlya tekushchego kontrolya protsesssa shlifovaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Use of low-frequency acoustic oscillations for current control of the grinding process. PhD eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, 1999. 198 p.

24. Agafonov V.V. *Povyshenie effektivnosti kruglogo naruzhnogo vreznogo shlifovaniya putem upravleniya skorost'yu podachi po intensivnosti zvukovogo signala*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of circular external plunge grinding by controlling the feed rate by the intensity of the sound signal. PhD eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, 2010. 181 p.

25. Glagovskii B.A., Moskovenko I.B. [Sound index as a criterion for evaluation of abrasive tools characteristics]. *Trudy konferentsii "Intergrind 88"* [Conference proceedings "Intergrind 88"]. Budapest, 1988, pp. 45–52. (In Russian).

26. Kovarskaya E.Z., Moskovenko I.B., Pavlov I.V. [Quality control and control of physical and mechanical properties of solid and supersolid materials by sound index]. *Sovremennye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob'ektov* [Modern methods and devices for quality control and diagnostics of the state of objects]. Collection of articles of the 7th International Scientific and Technical Conference. Mogilev, 2020, pp. 367–372. (In Russian).

27. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Technology of metal grinding]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013. 616 p.

28. Ardashev D.V., Zhukov A.S. Eksperimental'noe issledovanie vzaimosvyazi vibroakusticheskikh parametrov protsesssa shlifovaniya s pokazatelyami makronerovnosti obrabotannoi poverkhnosti [Experimental study of the relationship between the vibro-acoustic parameters of the grinding process and the macro-roughness of the treated surface]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 9–19. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-6-19.

29. Ermolaev V.K. Razvitie profil'nogo shlifovaniya [Development of profile grinding]. *Ritm mashinostroeniya = Rhythm of Machinery*, 2019, no. 4, pp. 40–48.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).