



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Экспериментальное исследование взаимосвязи виброакустических параметров процесса шлифования с показателями макронеровности обработанной поверхности

Дмитрий Ардашев ^a, Александр Жуков ^{b, *}

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, ardashevdv@susu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9328-7148>, 89127773160@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.1 + 534.612.2

История статьи:

Поступила: 05 апреля 2021
Рецензирование: 22 апреля 2021
Принята к печати: 27 мая 2021
Доступно онлайн: 15 сентября 2021

Ключевые слова:

Акустический анализ звука
Корреляционно-регрессионный анализ
Процесс шлифования
Вибрации при шлифовании
Уровень звука
Отклонение от круглости
Отклонение от цилиндричности

Финансирование:

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для оценки текущего состояния технологической системы (ТС) при шлифовании предпочтительно использовать косвенные критерии. Такие подходы в отличие от прямых методов измерения могут осуществляться без прерывания производственного процесса. Основными параметрами, используемыми при косвенной оценке состояния режущего инструмента, являются состояния (до и после обработки) заготовки, тепловые и электрические характеристики зоны резания, виброакустические колебания процесса, силовые измерения. Работа посвящена исследованию акустических параметров шлифования как достаточно информативной и наименее ресурсозатратной характеристики. **Актуальность** разработки методов оценки состояния ТС на основе звуковых и топографических характеристик имеет множество аспектов, главными из которых являются применимость при управлении шлифованием, прогнозирование состояния режущего инструмента и планирование операций технологического процесса. **Цель работы** состоит в разработке математической модели зависимости виброакустических параметров процесса круглого наружного врезного шлифования от величины макронеровностей шлифованного образца. Разработка такой модели является необходимым этапом при проектировании методики прогнозирования состояния инструмента. Соответственно **предметом** работы являются одновременно два параметра – уровень звука, возникающий в процессе шлифования, и отклонения формы поверхности шлифованных образцов от цилиндричности. **Методами исследования**, применяемыми для достижения обозначенной цели, служат эксперимент по изучению звуковых явлений, сопровождающих круглое наружное врезное шлифование; измерение макронеровностей поверхности образцов, подвергнутых обработке, с применением координатно-измерительной машины; корреляционно-регрессионный анализ для получения математических зависимостей. **Результаты и обсуждение.** Получены две частные множественные линейные регрессионные модели, описывающие влияние скорости врезной подачи и времени работы шлифовального круга на уровень звука при шлифовании и на отклонения от цилиндричности обработанных образцов. На их основе разработана общая модель, устанавливающая взаимосвязь между звуковой характеристикой и показателем макронеровности обработанной поверхности. Показано, что звуковые характеристики (например уровень звука) могут быть использованы в качестве косвенного показателя текущего состояния ТС, позволяющего дать оценку уровню вибраций и соответственно прогнозировать качество продукции.

Для цитирования: 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.

Введение

Задача по обеспечению требований формы поверхностей при наружном шлифовании не уступает в своей значимости задачам по формированию требуемых шероховатости [1] или

*Адрес для переписки

Жуков Александр Сергеевич, магистрант
Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76,
454080, г. Челябинск, Россия
Тел.: 8 (351) 272-32-94, e-mail: 89127773160@mail.ru

точности диаметрального размера. Для таких параметров, как износостойкость, работоспособность, надежность и долговечность сочлененных узлов машин, соблюдение требований формы поверхностей деталей имеют наивысший приоритет. В частности, к таким требованиям относятся отклонения от круглости и цилиндричности.

Количество факторов, оказывающих влияние на параметр цилиндричности поверхности

при круглом наружном врезном шлифовании (КНВШ), велико. Однако влияние совокупности всех или большинства таких факторов на состояние обрабатываемой поверхности может быть учтено применением амплитудо-частотных характеристик технологической системы (ТС).

На учете вибрационных характеристик процесса шлифования сегодня основывается множество математических моделей, методик диагностики и прогнозирования состояний различных параметров технологической системы: технического состояния шлифовального оборудования [2]; текущего состояния шлифовального круга (ШК) [3–5]; качества обработанной поверхности [6]; отклонения от круглости с учетом кинематики процесса при бесцентровом шлифовании [7, 8] и др.

Негативное влияние высокоамплитудных вибраций на ТС в целом (повышение износа узлов и деталей станка, повышение вероятности их преждевременных отказов) и на качество продукции в частности (снижение параметров точности, шероховатости, отклонений формы) не вызывает сомнений и требует разработки способов и приемов раннего их обнаружения [9] и последующего исключения или минимизации [10–12].

Из приведенных литературных источников как зарубежных, так и отечественных видно, что в современном мире решение большинства задач, связанных с планированием производства, прогнозированием состояний ТС, оптимизации режимов шлифования, нивелирования погрешностей обработки и прочее основываются на разработке математических моделей (ММ).

Преимущество математического моделирования при описании сложных процессов и систем производства состоит в том, что данный метод позволяет исследовать конкретный параметр объекта, абстрагируясь от несущественных его характеристик, позволяет избежать высоких затрат, требующихся при их непосредственном исследовании. Построение модели и установление связи между фактором(ами) и откликом дает возможность выявить новые качественные характеристики объекта, неочевидные при других способах познания.

Из сказанного следует, что **целью** настоящей работы является разработка математической модели взаимосвязи виброакустических параме-

тров процесса КНВШ с величиной макронеровностей шлифованного образца.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- постановка эксперимента;
- обработка результатов эксперимента;
- разработка ММ звуковой характеристики;
- разработка ММ отклонений от цилиндричности;
- разработка обобщающей ММ взаимосвязи звуковой характеристики с отклонениями от цилиндричности.

Данное исследование проводится в рамках решения общей задачи по разработке методики прогнозирования периода стойкости ШК, основанной на применении косвенного звукового критерия процесса шлифования, не требующего для своей регистрации и обработки значительных вложений. Такая методика служит цели повышения эффективности операций шлифования в условиях многономенклатурного производства за счет рационального использования ресурса инструмента.

Методика исследований

Объектом экспериментального исследования является процесс КНВШ. Предмет исследования – акустические характеристики процесса.

Эксперимент (рис. 1) проводился на круглошлифовальном станке 3М151Ф2 с применением шлифовального круга 1 600×50×305 25А F46 L 6 V 50 2кл ГОСТ Р 52781–2007.

Режимы обработки:

- скорость вращения круга $V = 50$ м/с;
- скорость радиальной подачи круга S_p в зависимости от проводимого опыта составляет 0,2; 0,3; 0,5; 0,8 мм/мин;
- скорость вращения заготовки в центрах $S_k = 25$ м/мин;
- ширина шлифования $l_{ш} = 10$ мм;
- продолжительность обработки $t_1 = 1$ мин, $t_2 = 2$ мин, $t_3 = 5$ мин.

Образцы, используемые для проведения эксперимента, представляют собой диски из стали 45, диаметром 70 мм, твердостью 50...55 HRC₃.

При планировании эксперимента учитывались существующие работы по исследованию износа шлифовальных кругов [13]. Технологические условия приняты на основе часто приме-

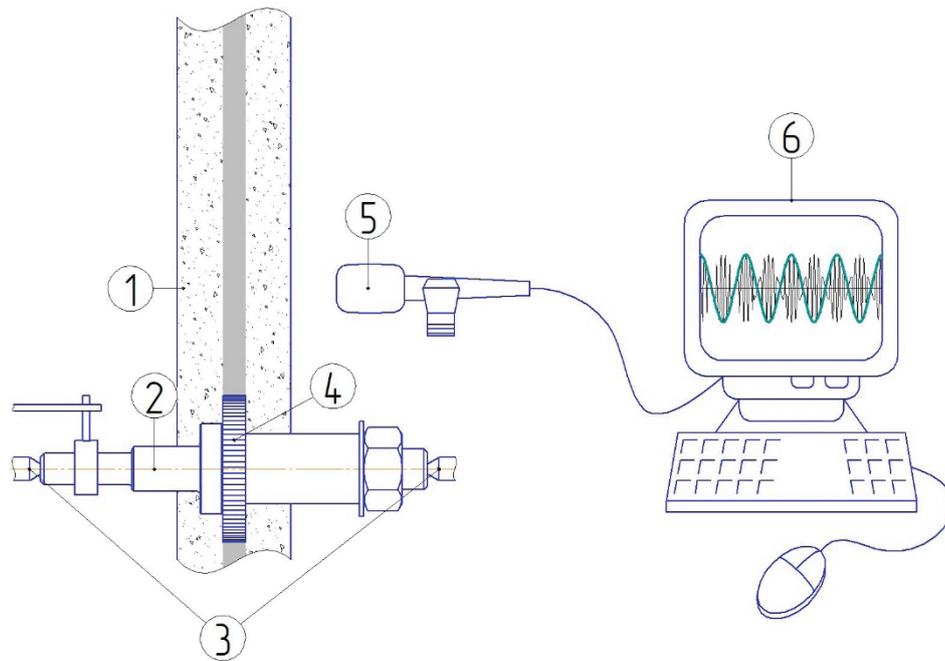


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – шлифовальный круг; 2 – оправка в центрах 3; 4 – образец из стали 45;
5 – микрофон; 6 – персональный компьютер

Fig. 1. Experiment scheme:

1 – grinding wheel; 2 – mandrel installed in centers 3; 4 – sample from steel 45;
5 – microphone; 6 – personal computer

няемых на производстве и уже исследованных в работах предшественников.

До начала опыта с поверхности образца удаляется припуск и следы предыдущей операции. ШК перед каждым новым опытом подвергается правке для обеспечения равных начальных условий и уменьшения вероятности возникновения соответствующей погрешности. Запись сигнала осуществлялась через компактный микрофон. В качестве инструмента для работы с полученными акустическими данными была выбрана программа для ПК – «SOUNDFORGEPro 13.0» как наиболее приемлемая по функционалу, доступности и удобству в обращении.

Подача смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону резания осуществляется струйно-напорным способом через сопло, размещенное вблизи защитного кожуха ШК. Производительность насоса подачи СОЖ составляет 12 л/мин.

В задачу каждого отдельного опыта входит фиксирование (запись) сигнала акустических вибраций при определенной комбинации условий эксперимента ($S_{pi}; t_i$).

Помимо этого определен реальный профиль каждого шлифованного образца в двух сечениях.

Расстояния между сечениями равны 5 мм. Определение величины отклонений формы образцов произведено с помощью координатно-измерительной машины КИМ–1000. Был применен метод сканирования с дискретностью 0,1 мм. В результате были получены данные о координатах облака точек для каждого образца, которые подлежат дальнейшей обработке и анализу.

Результаты и их обсуждение

Звуковые дорожки, записанные на цифровой носитель, представляют собой объем данных, несущих информацию об изменении амплитуды и частоты колебаний звуковой волны во времени.

Спектральный анализ звука, генерируемого процессом шлифования, позволил определить распределение частот по спектру в каждый момент и их амплитуду.

Значения амплитуды уровня звука регистрировались в рамках так называемого информационного диапазона частот 700...780 Гц, установленного в работах В.Ф. Гурьянихина [14–15]. Информативный диапазон частот связан непосредственно с процессом резания. Природа

посторонних звуковых колебаний, несомненно присутствующих на получаемых записях (звуки работы гидравлических насосов; звуки высокочастотного вращения шлифовальной бабки и других узлов станка; звук, с которым СОЖ оmyвает зону резания и удаляется обратно в резервуар системы, и т. д.), отличаются от акустики шлифования и имеют другие значения частот. Следовательно, целесообразным является анализ звука в пределах информативного частотного диапазона.

Для повышения степени достоверности результатов эксперимента каждый опыт с неизменными факторами проводился трижды. В табл. 1 сведены усредненные из трех опытов данные по величине уровня звука, которые получили графическое отображение в виде точечных зависимостей распределения уровня звука на плоскости амплитуда–время (рис. 2 и 3).

Проанализировав графики акустики, можно выделить два характерных этапа.

Первый этап – этап интенсивного роста уровня звука. Здесь происходит обработка заготовки профилем ШК, сформированного правкой. Продолжительность этого этапа зависит от скорости врезной подачи ШК. Шлифование на втором этапе происходит приработанным ШК. Рост уровня звука продолжается, однако происходит значительно медленнее по сравнению с первым этапом.

Лурье Г.Б. в своих работах, посвященных изучению вибраций технологической системы при шлифовании [16–18], обосновал разделение цикла износа абразивных зерен между правками на три этапа:

– начальный – период после правки, во время которого наблюдается повышенный износ режущих вершин зерен – происходит вырыв дефектных

Таблица 1

Table 1

Усредненные данные уровня звука для различных технологических условий
Average sound level data for various technological conditions

Время работы ШК, t , мин / Grinding wheel running time, t , min	Скорость врезной подачи S_p , мм/мин / Radial feed rate S_p , mm/min			
	0,2	0,3	0,5	0,8
	Средний уровень звука β , дБ / Average sound level β , dB			
0,25	-54,67	-58,00	-62,67	-59,33
0,50	-52,00	-54,67	-59,33	-44,00
0,75	-48,67	-50,33	-47,33	-39,33
1,00	-50,00	-46,33	-42,33	-34,33
1,25	-46,67	-45,33	-37,33	-34,67
1,50	-45,33	-44,67	-34,33	-33,33
1,75	-42,33	-45,67	-33,67	-29,67
2,00	-42,67	-45,67	-34,67	-31,33
2,25	-41,00	-42,33	-34,33	-28,00
2,50	-39,67	-39,00	-31,67	-27,67
2,75	-41,33	-37,67	-32,67	-28,33
3,00	-39,67	-36,33	-32,00	-29,00
3,25	-38,00	-33,00	-31,67	-27,00
3,50	-37,33	-32,33	-30,67	-29,67
3,75	-35,67	-33,67	-32,00	-27,33
4,00	-34,67	-33,67	-32,00	-29,67
4,25	-33,67	-32,00	-32,00	-28,00
4,50	-34,67	-32,00	-30,67	-27,00
4,75	-34,00	-30,67	-30,67	-27,67
5,00	-32,00	-31,67	-31,33	-29,00

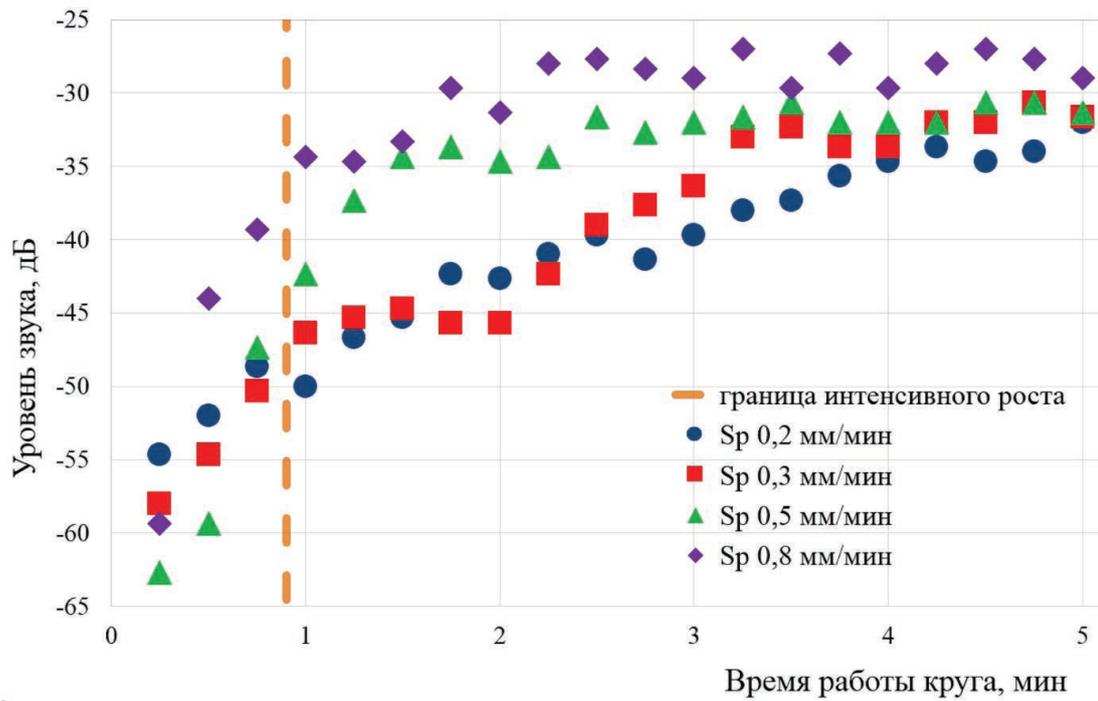


Рис. 2. Распределение значений амплитуд уровня звука во времени

Fig. 2. Distribution of sound level amplitudes in time

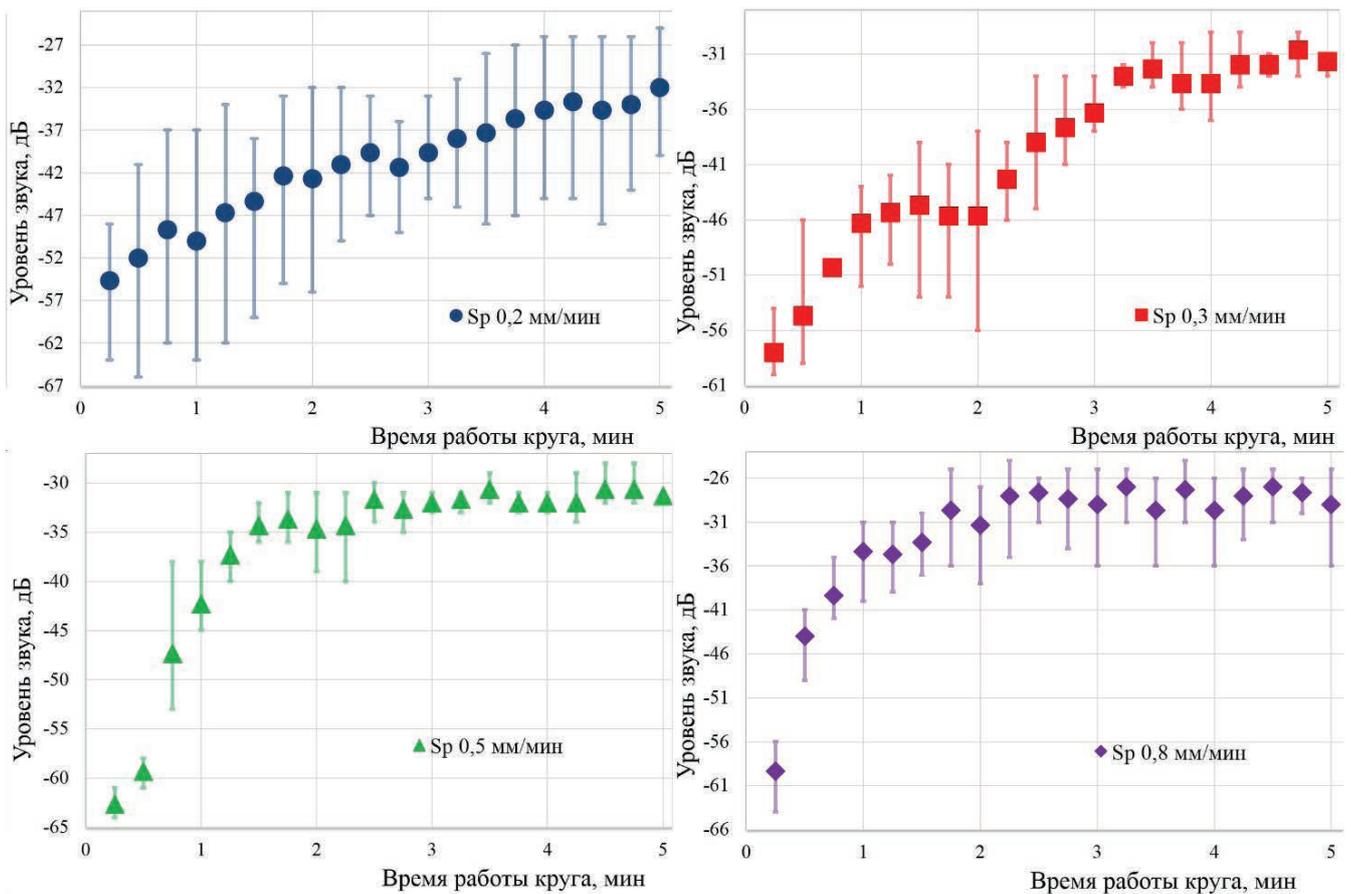


Рис. 3. Доверительные интервалы уровня звука

Fig. 3. Confidence intervals of sound level

по форме и невыгодно-ориентированных зерен; с поверхности ШК удаляется связка. Этап характеризуется малой продолжительностью, которая зависит от правки и от режимов обработки.

– нормальный – период, во время которого происходит механический износ режущих кромок абразивных зерен, при этом, по сравнению с начальным этапом, износ замедляется, на зернах образуются площадки износа. При повышенных режимах, когда нагрузка на абразивные зерна значительна, наблюдается откалывание от зерен более крупных частиц – явление самозатачивания.

– аварийный – этап, на котором вновь происходит усиление износа абразивного зерна частично вследствие увеличения амплитуды автоколебаний. Однако износ в рамках аварийного этапа происходит значительно медленнее по сравнению с нормальным периодом.

Более современные экспериментальные исследования износа шлифовальных кругов, выполненные А.А. Дьяконовым, Д.В. Ардашевым [13], качественно подтверждают наличие начального и нормального этапа интенсивности износа абразивного зерна на примере изменений величины площадок затупления шлифовального

круга марки 1 600×50×305 24А F60 L 7 V 50 2кл ГОСТ Р 52781–2007 (рис. 4 [18]). Для различных подач четко выражен этап повышенной скорости увеличения площадок затупления и этап умеренной скорости увеличения площадок износа. Кроме того, определены значения времени для кругов с различными характеристиками, соответствующие продолжительности начального этапа.

Таким образом, данные, полученные в ходе эксперимента, согласуются с исследованиями Г.Б. Лурье, А.А. Дьяконова и Д.В. Ардашева. Можно утверждать, что рост уровня звука имеет корреляцию с ростом площадок затупления при шлифовании, кроме того, имеются схожие разделения характерных этапов поведения звуковых параметров и показателей износа шлифовального круга во времени.

Проведение корреляционно-регрессионного анализа данных эксперимента по исследованию особенностей поведения акустики, сопровождающей процесс шлифования, обусловлено необходимостью преобразования качественных зависимостей к математической форме.

В результате проведения ряда расчетов с применением приемов математической статистики

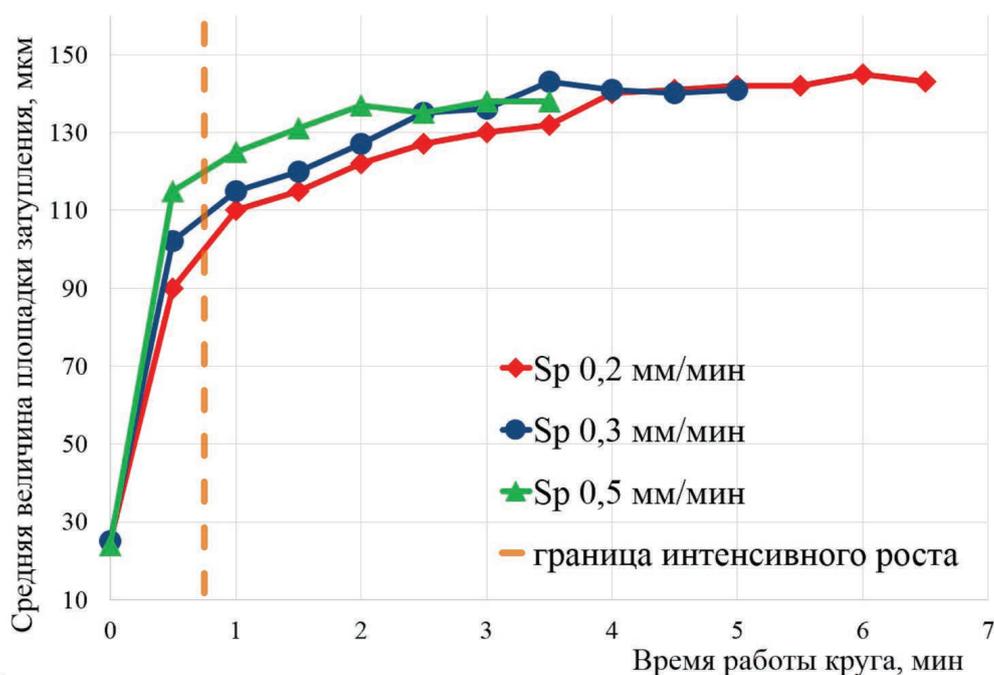


Рис. 4. Кривые зависимостей величины площадки затупления для различных подач по времени

Fig. 4. Curves of dependences of the size of the blunting area for different feeds over time

была получена множественная линейная регрессионная модель, устанавливающая взаимосвязь между факторами скорости врезной подачи (S_p , мм/мин) и временем работы ШК (t , мин) и параметром уровня звука (β , дБ):

$$\beta = -56,5 + 15,4S_p + 4,5t. \quad (1)$$

Проверка значимости полученной регрессионной модели проводится с помощью критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера для уровня значимости $P = 0,05$ и значений степеней свободы $f_R = 2$ и $f_e = 77$ составляет $F_{\text{табл}} = 3,115$. Расчетное значение определено в соответствии с методикой математической статистики:

$$F_p = 115,2 \gg F_{\text{табл}} = 3,115. \quad (2)$$

Поскольку расчетное значение критерия Фишера много больше табличного значения, можно заключить, что найденное уравнение регрессии является статистически значимым и может быть использовано для определения и прогнозирования величины уровня звука в зависимости от скорости врезной подачи и времени от начала обработки.

Дальнейшее исследование было сосредоточено на изучении макронеровностей шлифованных образцов. Критерием оценки макронеровностей было выбрано значение отклонения от цилиндричности поверхности образцов. ГОСТ 24642–81 определяет цилиндричность как наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающего цилиндра в пределах нормируемого участка, т. е. значение цилиндричности измеренных образцов – это разность между наибольшим и наименьшим радиусом в двух сечениях.

Поскольку цилиндричность включает в себя такие параметры, как круглость, прямолинейность и параллельность [ГОСТ Р ИСО 230–1–2010], а также косвенно может характеризовать и точность размера, данный критерий следует признать наиболее удобным при комплексной оценке макронеровностей.

Анализ данных о координатах точек реальной поверхности шлифованных образцов, собранных с помощью КИМ, позволил сформировать полярные лепестковые диаграммы (круглограммы) (рис. 5), дающие визуальное графическое

представление о макронеровностях обработанных заготовок.

Анализ круглограмм показал, что неровности поверхностей образцов, выраженные через разности координат соседних точек, имеют непостоянный характер. В зависимости от комбинации значений рассматриваемых факторов отклонения от номинальной формы качественно отличаются. Кроме того, имеются и количественные отличия – параметр амплитуды неровностей. Наблюдается рост амплитуд неровностей с увеличением скорости радиальной подачи и с увеличением времени обработки.

Известно, что реальный профиль поверхности, полученной с помощью механической обработки, формируется из следующих составляющих: отклонения формы, волнистости и шероховатости [19–21], каждая из которых имеет уникальную природу и характерные параметры. Наличие всех составляющих формирования профиля имеет место на представленных круглограммах. С использованием данных круглограмм путем простейших вычислений определены значения цилиндричности образцов (табл. 2). На основании допущения, что в начальный момент форма образцов представляла собой идеальный геометрический цилиндр, становится возможным построение графика зависимостей цилиндричности от скорости врезной подачи по времени (рис. 6).

Из графика видно, что отклонения от цилиндричности возрастают с течением времени, а также имеет прямую зависимость от скорости врезной подачи. Кроме того, необходимо заметить некоторое отклонение от схожего характера возрастающих во времени значений отклонений от цилиндричности на подаче 0,8 мм/мин. Такое отклонение может быть связано с наличием режима самозатачивания ШК, которое в дальнейшем переходит в этап преимущественного затупления.

Для большей наглядности на рис. 7 приводятся кривые распределения значений радиуса, измеренного на КИМ – так называемые полигоны частот распределения размера для заготовок, шлифованных на подаче 0,8 мм/мин.

Наиболее заостренные пики кривых распределения характерны для устоявшегося режима шлифования (вторая минута) – при этом режиме разброс значений минимален, отклонения от

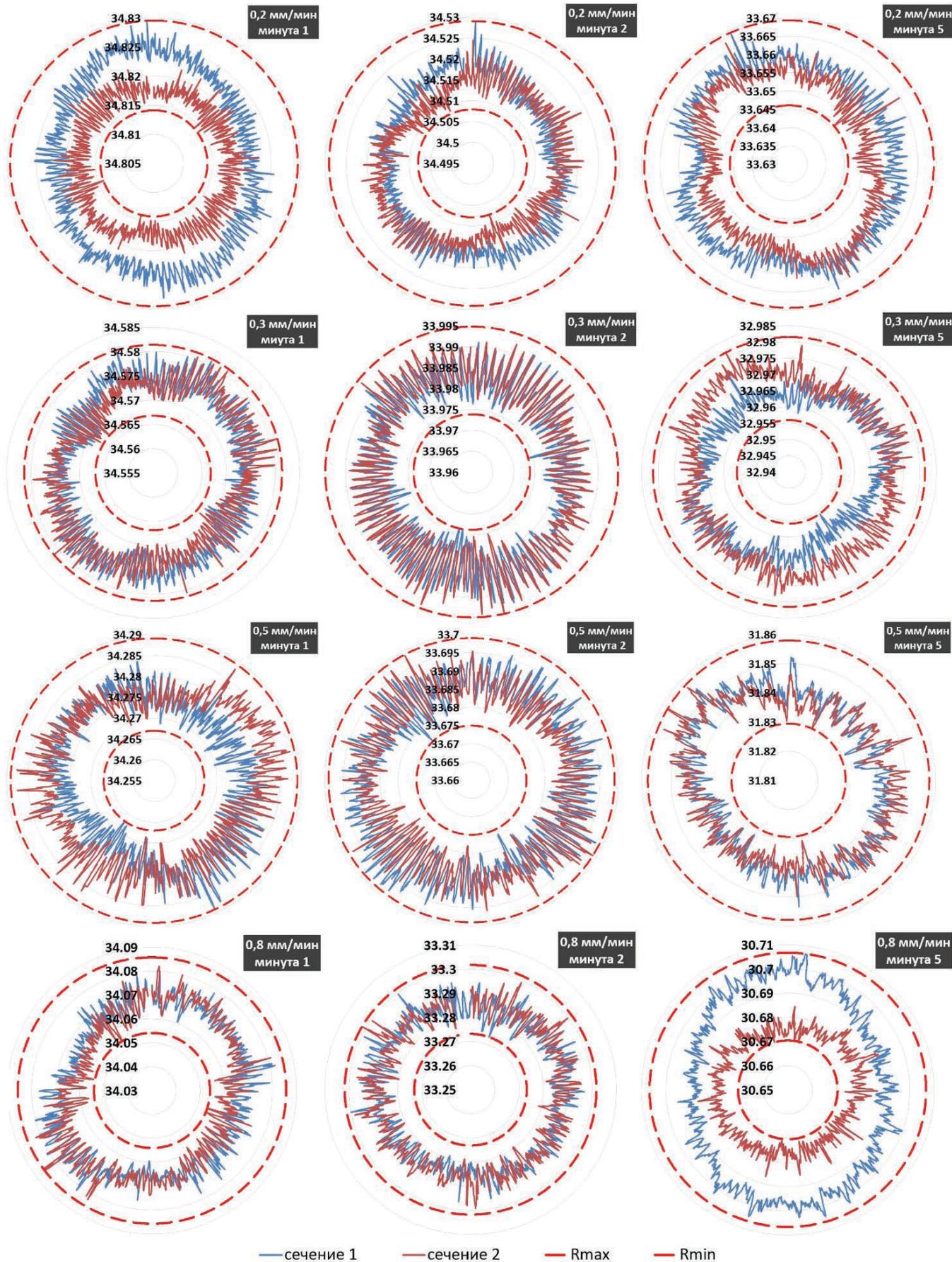


Рис. 5. Круглограммы
Fig. 5. Roundness charts

Значения отклонений от цилиндричности
Values of deviations from cylindricity

Время работы ШК, t , мин / Grinding wheel running time, t , min	Скорость врезной подачи S_p , мм/мин / Radial feed rate S_p , mm/min			
	0,2	0,3	0,5	0,8
	Отклонение от цилиндричности Δ , мм / Cylindricity deviation Δ , mm			
1	0,01542	0,01459	0,02214	0,03165
2	0,02115	0,02097	0,02401	0,02863
5	0,02323	0,02558	0,02849	0,03629

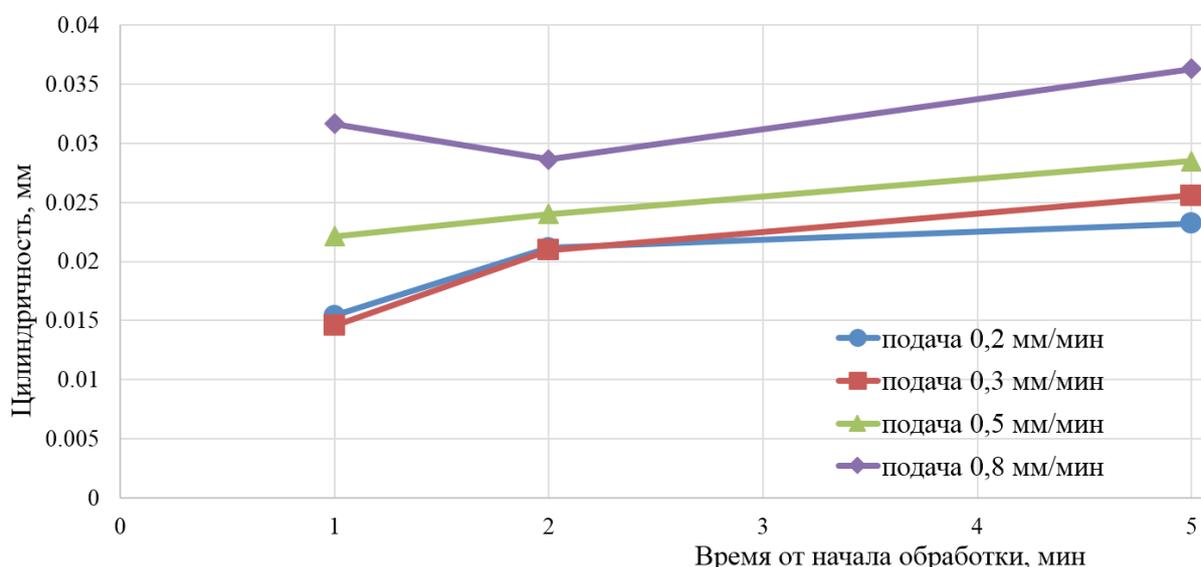


Рис. 6. Кривые изменения цилиндричности

Fig. 6. Broken line of cylindricity

идеальной геометрической формы малы. Начальный этап приработки характеризуется более пологой (холмообразной) формой кривой, что говорит о большей ширине разброса значений, меньшем постоянстве размера. И, наконец, после пяти минут обработки распределение значений формирует два отчетливых холма, показывающее стремление значений выборки к двум доминирующим значениям, что еще раз подтверждает наличие ярковыраженного отклонения формы – отклонения от цилиндричности.

В соответствии с [19], если при исследовании профиля обработанной заготовки не обнаружена периодическая составляющая, эмпирический закон распределения должен быть близок к нор-

мальному, поскольку нет оснований полагать, что какой-либо технологический фактор оказывает доминирующее воздействие на профиль поверхности, отклоняя его распределение от нормального.

Именно это и наблюдается на рис. 7. Распределение значений после первой и второй минуты шлифования соответствует закону Гаусса.

Кривая, построенная по данным, собранным после пяти минут шлифования, имеет две вершины. Это может свидетельствовать об отклонениях фактического распределения от нормального вследствие наличия систематической составляющей в профиле, однако при рассмо-

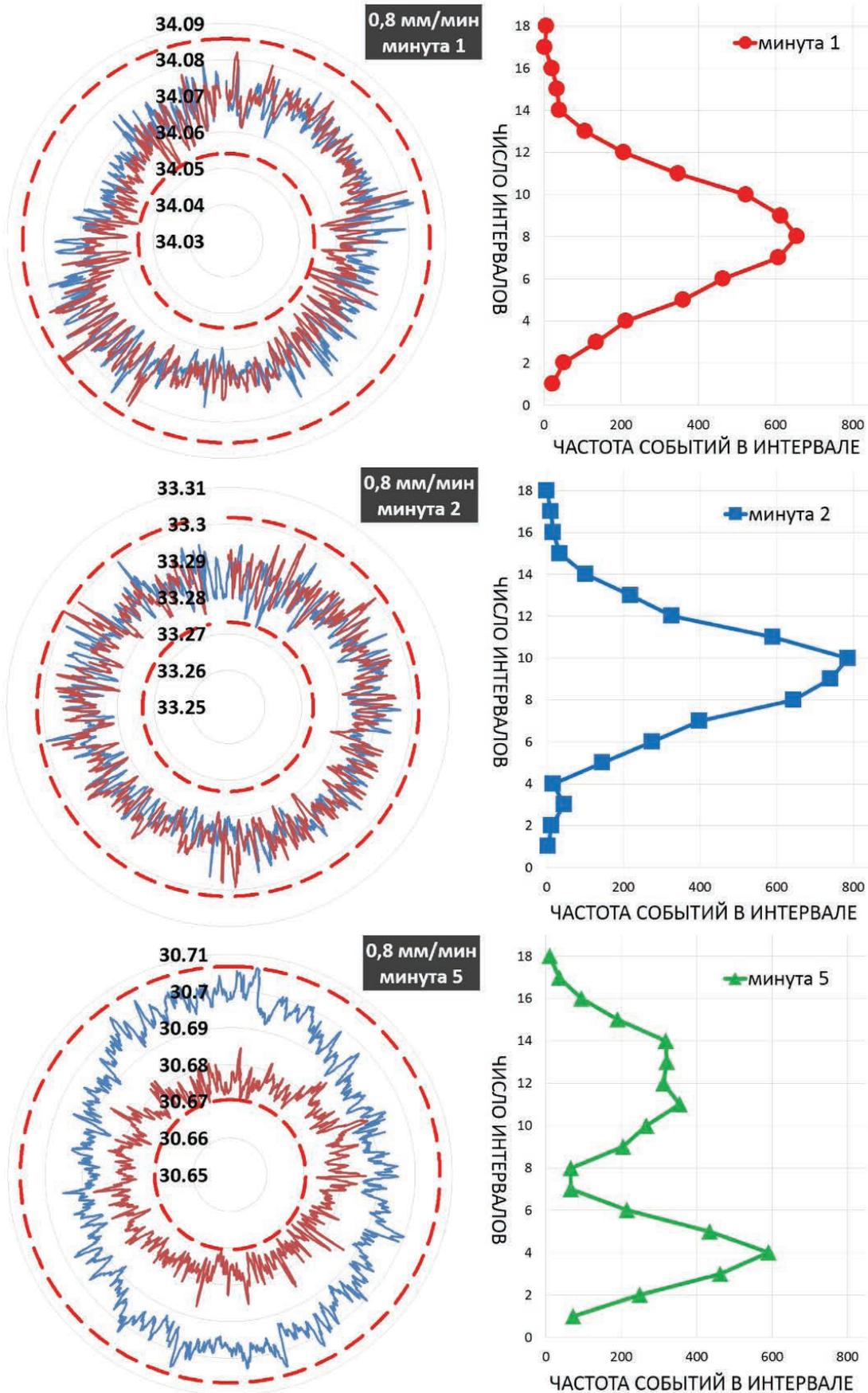


Рис. 7. Эмпирическое распределение макронеровностей

Fig. 7. Empirical distribution of macro-roughness

трении круглограммы очевидно, что причиной такого распределения является именно наличие конусообразной формы шлифованной поверхности. Кроме того, как утверждает Т. С. Лоповок, двувёршинность более характерна при обработке методами, имеющими мощную систематическую основу: точение, фрезерование, обкатывание и т.п. Операциям круглого наружного шлифования данное явление свойственно в гораздо меньшей степени.

Вновь применив метод корреляционно-регрессионного анализа, была построена математическая модель зависимости значения отклонения от цилиндричности (Δ , мм), от скорости врезной подачи (S_p , мм/мин) и времени работы ШК (t , мин):

$$\Delta = 0,006 + 0,012S_p + 0,046t. \quad (3)$$

Табличное значение критерия Фишера для уровня значимости $P = 0,05$ и значений степеней свободы $f_R = 2$ и $f_e = 13$ составляет $F_{\text{табл}} = 3,8$. Расчетное значение составило 9,75:

$$F_p = 9,75 < F_{\text{табл}} = 3,8. \quad (4)$$

Следовательно, можно считать полученную модель статистически значимой.

Существует возможность объединения выражений (1) и (3), выразив общую переменную времени и приравняв полученные выражения. Итоговое выражение после всех преобразований примет вид

$$\Delta = 0,001\beta + 0,004S_p + 0,065. \quad (5)$$

Математическая модель (5) отражает, каким образом отклонение от цилиндричности образца круглого профиля зависит от уровня звука, генерируемого в процессе шлифования с учетом радиальной подачи.

Основными факторами, влияние которых рассматривается в работе, являются скорость врезной подачи и время работы ШК. Влияние прочих технологических условий необходимо исследовать отдельно и вносить необходимые корректировки в полученную зависимость для расширения диапазона применимости математической модели.

Выводы

1. Параметр уровня звука, замеренного в процессе шлифования, имеет достаточно сложный характер в силу стохастической природы процесса шлифования, однако имеется общий тренд к росту по ходу обработки.

2. Качественно показано наличие двух характерных этапов развития звуковой характеристики процесса шлифования, согласующихся с этапами затупления ШК, по Г.Б. Лурье и А.А. Дьяконову.

3. Нарастающие амплитуды вибраций ТС в процессе шлифования оказывают непосредственное влияние на формирование макропрофиля поверхности обрабатываемой заготовки.

В свою очередь, скорость нарастания вибрации по ходу обработки зависит от значения скорости врезной подачи, применяющейся при обработке.

4. Разработаны математические регрессионные модели, отражающие влияние факторов скорости врезной подачи (S_p , мм/мин) и времени работы ШК (t , мин) на параметры уровня звука (β , дБ) и отклонение от цилиндричности шлифованного образца (Δ , мм).

Разработана также эмпирическая модель зависимости отклонений цилиндричности от уровня звука, дающая возможность прогнозировать при заданной скорости радиальной подачи значение отклонения от цилиндричности по уровню звука. Практическое применение данной модели необходимо ограничить следующими технологическими условиями:

- скорость резания – 50 м/с;
- скорость радиальной (врезной) подачи – 0,2...0,8 мм/мин;
- скорость вращения заготовки в центрах – 25 м/мин;
- продолжительность обработки – до 5 мин;
- шлифовальные круги из белого электрокорунда на керамической связке;
- заготовки из материала Ia группы обрабатываемости [22] диаметром 60...80 мм.

5. Звуковые характеристики в дальнейшем могут быть использованы в качестве косвенного показателя текущего состояния рабочей поверхности режущего инструмента, позволяющего дать оценку уровню вибраций, возникающих при обработке, что возможно позволит прогнозировать качество детали по параметру макропрофиля обрабатываемой поверхности в режиме реального времени.

Список литературы

1. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear / P. Puerto, R. Fernández, J. Madariaga, J. Arana, I. Gallego // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 63. – P. 174–182. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.181.
2. A unified approach towards performance monitoring and condition-based maintenance in grinding machines / Muhammad Ahmer, Par Marklund, Martin Gustafsson, Kim Berglund // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 93. – P. 1388–1393. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.094.
3. *Taewan Lee E., Fan Z., Sencer B.* Real-time grinding wheel condition monitoring using linear imaging // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 49. – P. 139–143. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.009.
4. *Игнатьев А.А., Коновалов В.В., Козлов Д.В.* Определение периодичности правки шлифовального круга по виброакустическим колебаниям // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2014. – № 1 (74). – С. 71–74.
5. *Захезин А.М., Малышева Т.В.* Определение износа шлифовального круга по параметрам вибрации станка // *Вестник ЮУрГУ. Машиностроение*. – 2007. – № 11. – С. 48–53.
6. In-process characterization of surface finish in cylindrical grinding process using vibration and power signals / S. Mahata, P. Shakyu, N.R. Babu, P.K. Prakasam // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 88. – P. 335–340. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.058.
7. A novel approach to roundness generation analysis in centerless through-feed grinding in consider of decisive parameters of grinding gap by use of 3D kinematic simulation / M.H. Otaghvar, B. Hahn, H. Werner, H. Omiditabrizi, D. Bahre // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 247–250. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.007.
8. Optimization of centerless through-feed grinding using 3D kinematic simulation / M.H. Otaghvar, B. Hahn, H. Werner, H. Omiditabrizi, D. Bahre // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 79. – P. 308–312. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.072.
9. Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding / M. Ahrens, R. Fischer, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 8. – P. 374–378. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.119.
10. *Viitala R.* Minimizing the bearing inner ring roundness error with installation shaft 3D grinding to reduce rotor subcritical response // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2020. – Vol. 30. – P. 140–148. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.05.002.
11. An active damping method for chatter vibration in plunge grinding using electromagnetic actuators / M. Ahrens, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – P. 197–200. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.200.
12. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding / M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 58. – P. 422–427. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.
13. *Dyakonov A.A., Ardashev D.V.* Prediction of blunting area of abrasive grains on a grinding wheel // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 139 (12). – Art. 121004.
14. *Гурьянихин В.Ф., Аринин Д.В.* Влияние режимов шлифования на интенсивность акустического сигнала и показатели процесса круглого наружного врезного шлифования // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. – 2000. – № 4. – С. 79–83.
15. *Гурьянихин В.Ф., Агафонов В.В., Панков А.А.* Управление процессом круглого наружного врезного шлифования с использованием акустического сигнала // *СТИН*. – 2009. – № 2. – С. 35–40.
16. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
17. *Лурье Г.Б.* Вибрации при шлифовании // *Станки и инструмент*. – 1959. – № 1. – С. 15–17.
18. *Лурье Г.Б.* Автоколебания при шлифовании // *Абразивы*. – М.: ЦБТИ, 1961. – Вып. 27. – С. 78–83.
19. *Лоповок Т.С.* Волнистость поверхности и ее измерение. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 184 с.
20. *Raja J., Muralikrishnan B., Fu S.* Recent advances in separation of roughness, waviness and form // *Precision Engineering*. – 2002. – Vol. 26, iss. 2. – P. 222–235. – DOI: 10.1016/S0141-6359(02)00103-4.
21. *Молотников В.Я.* Техническая механика: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2017. – 476 с.
22. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин, А.А. Дьяков. – Челябинск: Атоксо, 2007. – 384 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Experimental study of the relationship between the vibro-acoustic parameters of the grinding process and the macro-roughness of the treated surface

Dmitrii Ardashev^a, Alexander Zhukov^{b,}*

South Ural State University, 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, ardashevdv@susu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9328-7148>, 89127773160@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 05 April 2021
 Revised: 22 April 2021
 Accepted: 27 May 2021
 Available online: 15 September 2021

Keywords:

Acoustic analysis of sound
 Correlation and regression analysis
 Grinding process
 Vibration during grinding
 Sound level
 Deviations from circularity
 Deviations from cylindricality

Funding

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

ABSTRACT

Introduction. To assess the current state of the technological system (TS) during grinding, it is preferable to use indirect criteria. Such approaches, in contrast to direct measurement methods, can be carried out without interrupting the production process. The main parameters used in the indirect assessment of the state of the cutting tool are the state of the workpiece (before and after processing), thermal and electrical characteristics of the cutting zone, vibroacoustic vibrations of the process, and force measurements. The work is devoted to the study of the acoustic parameters of grinding as a sufficiently informative and least resource-intensive characteristic. **The relevance** of the development of methods for assessing the state of the vehicle based on sound and topographic characteristics has many aspects, the main of which are applicability in grinding control, predicting the state of the cutting tool and planning the operations of the technological process. **The aim of the work** is to develop a mathematical model of the dependence of the vibroacoustic parameters of the external circular plunge-cut grinding process on the macro-roughness of the polished sample. The development of such a model is a necessary step in the design of a methodology for predicting the state of a tool. Accordingly, **the subject** of work is presented by two parameters simultaneously – the sound level arising in the process of grinding and the deviation of the surface shape of the ground images from cylindricality. **The research methods** used to achieve the designated aim were following: an experiment to study the sound phenomena accompanying round external plunge-cut grinding; measurement of macro-roughness of the surface of the samples, subjected to processing, using a coordinate measuring machine; correlation and regression analysis to obtain mathematical dependencies. **Results and discussion.** Two particular multiple linear regression models are obtained that describe the effect of the feed rate and the operating time of the grinding wheel on the sound level during grinding and on deviations from the cylindricality of the processed samples. On the basis of particulars, a general model is developed that establishes the relationship between the sound characteristic and the macro-roughness index of the treated surface. It is shown that the sound characteristics (for example, the sound level) can be used as an indirect indicator of the current state of the vehicle, which makes it possible to assess the level of vibrations and, accordingly, to predict the quality of products.

For citation: Ardashev D.V., Zhukov A.S. Experimental study of the relationship between the vibro-acoustic parameters of the grinding process and the macro-roughness of the treated surface. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 6–19. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-6-19. (In Russian).

References

1. Puerto P., Fernández R., Madariaga J., Arana J., Gallego I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 174–182. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.181.
2. Ahmer M., Marklund P., Gustafsson M., Berglund K. A unified approach towards performance monitoring and condition-based maintenance in grinding machines. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 93, pp. 1388–1393. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.094.
3. Taewan Lee E., Fan Z., Sencer B. Real-time grinding wheel condition monitoring using linear imaging sensor. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 49, pp. 139–143. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.009.

* Corresponding author

Zhukov Alexander S., Master's Degree student
 South Ural State University,
 76 Lenin prospekt,
 454080, Chelyabinsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (351) 272-32-94, e-mail: 89127773160@mail.ru



4. Ignatyev A.A., Konovalov V.V., Kozlov D.V. Opredelenie periodichnosti pravki shlifoval'nogo kruga po vibroakusticheskim kolebaniyam [Grinding wheel dressing frequency based on vibroacoustic fluctuations]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo = Vestnik Saratov State Technical University*, 2014, no. 1 (74), pp. 71–74.
5. Zakhezin A.M., Malysheva T.V. Opredelenie iznosa shlifoval'nogo kruga po parametram vibratsii stanka [Determination of grinding wheel wear by vibration parameters of the machine]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2007, no. 11, pp. 48–53.
6. Mahata S., Shakya P., Babu N.R., Prakasam P.K. In-process characterization of surface finish in cylindrical grinding process using vibration and power signals. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 88, pp. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.058.
7. Otaghvar M.H., Hahn B., Werner H., Omiditabrizi H., Bahre D. A novel approach to roundness generation analysis in centerless through-feed grinding in consider of decisive parameters of grinding gap by use of 3D kinematic simulation. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 247–250. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.007.
8. Otaghvar M.H., Hahn B., Werner H., Omiditabrizi H., Bahre D. Optimization of centerless through-feed grinding using 3D kinematic simulation. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 79, pp. 308–312. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.072.
9. Ahrens M., Fischer R., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T. Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 374–378. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.119.
10. Viitala R. Minimizing the bearing inner ring roundness error with installation shaft 3D grinding to reduce rotor subcritical response. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, vol. 30, pp. 140–148. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.05.002.
11. Ahrens M., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T. An active damping method for chatter vibration in plunge grinding using electromagnetic actuators. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 197–200. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.200.
12. Ahrens M., Damm J., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 422–427. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.
13. Dyakonov A.A., Ardashev D.V. Prediction of blunting area of abrasive grains on a grinding wheel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139 (12), art. 121004.
14. Guryanihin V.F., Arinin D.V. Vliyanie rezhimov shlifovaniya na intensivnost' akusticheskogo signala i pokazateli protsessa kruglogo naruzhnogo vrezhnogo shlifovaniya [The influence of grinding regimes or acoustic signal intensity and process parameters of round outside cut-in grinding]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ulyanovsk state technical university*, 2000, no. 4, pp. 79–83.
15. Guryanikhin V.F., Agafonov V.V., Pankov A.A. Upravlenie protsessom kruglogo naruzhnogo vrezhnogo shlifovaniya s ispol'zovaniem akusticheskogo signala [Control of the process of external circular plunge-cut grinding using an acoustic signal]. *STIN = Machines and Tooling*, 2009, no. 2, pp. 35–40. (In Russian).
16. Lurie G.B. *Shlifovanie metallov* [Metal grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 172 p.
17. Lurie G.B. Vibratsii pri shlifovanii [Vibrations during grinding]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1959, no. 1, pp. 15–17. (In Russian).
18. Lurie G.B. Avtokolebaniya pri shlifovanii [Self-oscillation during grinding]. *Abrazivy* [Abrasives]. Moscow, TsBTI Publ., 1961, iss. 27, pp. 78–83.
19. Lopovok T.S. *Volnistost' poverkhnosti i ee izmerenie* [Surface waviness and its measurement]. Moscow, Standards Publ., 1973. 184 p.
20. Raja J., Muralikrishnan B., Fu S. Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Precision Engineering*, 2002, vol. 26, pp. 222–235. DOI: 10.1016/S0141-6359(02)00103-4.
21. Molotnikov V.Ya. *Tekhnicheskaya mekhanika* [Technical mechanics]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2017. 476 p.
22. Ardashev D.V., Anel'chik D.E., Butorin G.I., D'yakonov A.A. *Rezhimy rezaniya na raboty, vpolnyaemye na shlifoval'nykh i dovodochnykh stankakh s ruchnym upravleniem i poluavtomatakh* [Cutting modes for work performed on grinding and lapping machines with manual control and semiautomatic devices]. Chelyabinsk, Atokso Publ., 2007. 384 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.