

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Д.В. Ардашев, А.С. Жуков, Б.А. Чаплыгин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В работе рассмотрены результаты экспериментального исследования процесса круглого наружного врезного шлифования и сопровождающие его звуковые явления. Акустические колебания, порождаемые процессом абразивной обработки, являются косвенным параметром, характеризующим состояние процесса резания. Такая информация применима для управления процессом шлифования и планирования технологического процесса. Достоинство метода учета и прогнозирования текущего состояния технологической системы при шлифовании, основанного на применении акустических данных, заключается в возможности его применения без прерывания производственного процесса.

Предметом экспериментального исследования является акустический сигнал, возникающий при шлифовании. Цель работы заключается в проведении экспериментального исследования зависимости звуковых параметров процесса шлифования от технологических условий операции и их связи с параметрами качества обработки.

Основными методами, применяющимися для достижения обозначенной цели, являются эксперимент, измерение и анализ.

Эксперимент позволил получить данные, необходимые для дальнейшей обработки. Регистрация звукового сигнала, генерируемого в процессе шлифования на разной скорости подачи – основная задача опытов эксперимента. С помощью контактных измерений был определен реальный профиль шлифованных образцов, что является важнейшим этапом для определения взаимосвязи между характеристикой процесса шлифования и показателями качества обработанной поверхности. Аналитический метод применялся для обработки полученных данных эксперимента и измерений. С его помощью из широкого диапазона были выявлены информативные звуковые частоты, отражающие изменения процесса шлифования во времени. Анализ данных измерения дал возможность оценить отклонение шлифованных образцов от круглости в зависимости от технологических условий реализации операции, определить параметры, которые оказывают наибольшее влияние на этот критерий качества обработки.

В результате проведения исследования была установлена взаимосвязь между акустической характеристикой – звуковым давлением и параметром качества шлифованной поверхности – отклонением от круглости.

Полученные знания о звуковой характеристике процесса шлифования могут быть применены для более рационального использования ресурса абразивного инструмента через прогнозирование периода стойкости шлифовального круга.

Ключевые слова: акустический анализ звука, спектральный анализ звука, процесс шлифования, отклонения от круглости, период стойкости шлифовального круга.

Ключевые слова: акустический анализ звука, спектральный анализ звука, процесс шлифования, отклонения от круглости, период стойкости шлифовального круга.

Введение

Период стойкости абразивного инструмента, наряду с затуплением и расходом абразивного инструмента или скоростью его изнашивания, является важным фактором при планировании шлифовальных операций. Рациональное использование ресурса работоспособности шлифовального круга (ШК) для конкретных технологических условий позволяет значительно повысить производительность и эффективность процесса шлифования. Значимость параметра ресурса ра-

ботоспособности ШК при планировании технологического процесса операций шлифования постоянно возрастает в текущих экономических условиях при увеличивающейся доле многономенклатурного производства.

Наиболее часто используемые методы управления процессом абразивной обработки основываются на рекомендациях, предлагаемых в разнообразных нормативных справочниках [1–4], на использовании математических моделей определения искомых параметров [5–7] или на методах активного контроля, использующих экспериментальное исследование текущих актуальных параметров для конкретных технологических условий [8].

Справочные или статистические рекомендации слабо приспособлены к учету большого количества факторов, оказывающих влияние на процесс шлифования, имеют низкий уровень универсальности. Кроме того, такие способы не позволяют прогнозировать период стойкости ШК и гарантировать стабильное выполнение требований, предъявляемых к качеству шлифованной поверхности. Методы, предполагающие применение математического моделирования, более предпочтительны, поскольку зачастую являются более точными и могут учитывать большее количество входных факторов, однако их применение требует высокой квалификации работника, что затрудняет внедряемость методов на производство. Применение же экспериментальных исследований для определения ресурса работоспособности зависит от конкретных входных параметров, требует тщательного планирования, строгого учета большого количества переменных для обеспечения чистоты и адекватности эксперимента. Поэтому данный метод чаще находит применение в академических целях, является чрезвычайно трудоемким и не получает достаточно широкого применения на предприятиях, в особенности на малых.

В плане трудозатрат по сравнению с классической лезвийной обработкой (точение, фрезерование) шлифованию характерны более высокие нормы времени на приемы, непосредственно не связанные со снятием припуска (на наладку и переналадку оборудования, замену и балансировку ШК). Из этого следует, что методы и приемы, позволяющие использовать ресурс работоспособности инструмента, наиболее рационально важны и актуальны, их разработка – важная задача, решаемая для повышения производительности операций шлифования в целом.

Также необходимо отметить, что часто объектом, по отношению к которому применяются методы активного контроля, является лишь обрабатываемая деталь, тогда как именно комплексный подход к отслеживанию и анализу процессов, протекающих во всех элементах технологической системы, может значительно повысить эффективность ее работы.

Процессы формообразования, в том числе и шлифование, имеют косвенные характеристики, не имеющие непосредственного отношения к явлению износа режущего инструмента, удаления припуска или к другим их составляющим. Такие характеристики в перспективе и при должном их изучении могут позволить достаточно точно, хоть и не напрямую, охарактеризовать тот или иной процесс, получить представление о состоянии системы без непосредственного измерения ее характеристик.

Следовательно, существует необходимость в разработке других методов определения периода стойкости ШК, имеющих в своей основе какие-либо косвенные характеристики процесса шлифования, позволяющие оценивать состояние режущей способности ШК без непосредственного вмешательства в процесс обработки и его прерывания. В настоящей работе в качестве такой косвенной характеристики предлагается рассмотреть звуковые вибрации, создаваемые в процессе абразивной обработки.

Метод акустической эмиссии (АЭ) широко распространен в машиностроении, содержит информацию о физических процессах, происходящих при трении, деформировании или разрушении материалов [9].

Высокая информативность акустического метода дает возможность:

- проведения диагностирования износа режущего инструмента и определения его режущих свойств;
- проведения корректирования режимов обработки с целью их интенсификации, осуществления непрерывного или дискретного активного контроля за ходом технологического процесса обработки;
- определения качества обработанной поверхности;

- разработки моделей аварийных ситуаций – нерасчетных режимов функционирования технологического процесса и, как следствие, решение задачи по их прогнозированию и устранению.

Кроме того, в работах последнего десятилетия рассматривались некоторые аспекты, связывающие акустику процесса шлифования с мониторингом процесса абразивной обработки [10], с определением топографии ШК [11], с точностью и эффективностью [12].

Шлифование на сегодняшний день является одним из самых распространенных видов обработки металлов резанием (в общем машиностроении примерно каждый десятый станок является шлифовальным [13]). Следовательно, разработка методов определения периода стойкости ШК с применением акустических характеристик процесса шлифования в условиях современных гибких машиностроительных производств остается актуальной.

Основная часть

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование зависимости звуковых параметров процесса шлифования от условий абразивной обработки.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Выявить взаимосвязь между скоростью врезной подачи и звуковым давлением процесса круглого наружного врезного шлифования (КНВШ).

2. Измерить величину макронеровностей шлифованных образцов. Сделать выводы о ее характере и зависимости от скорости врезной подачи при КНВШ.

3. Выявить взаимосвязь звуковой характеристики от показателей качества шлифованной поверхности.

Эксперимент

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

Эксперимент 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 $V_k = 50$ м/с;
- скорость вращения заготовки в центрах $v_k = 25$ м/мин;
- ширина шлифования $I_{ш} = 10$ мм;
- скорость радиальной подачи круга $V_{спад}$ варьировалась (0,2; 0,3; 0,5; 0,8 мм/мин).

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

До начала опыта и записи звука с поверхности образца удаляется припуск и следы предыдущей операции, ШК перед каждым новым опытом подвергается правке, чтобы обеспечить равные начальные условия и уменьшить вероятность возникновения соответствующей погрешности. Запись сигнала осуществлялась через компактный петличный 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.

Целевая функция (отклик) эксперимента – сигнал акустических вибраций. В задачу каждого отдельного опыта входит фиксирование параметра акустической характеристики при определенной комбинации факторов эксперимента.

Акустика

Результат эксперимента в виде акустических диаграмм сведен в табл. 1.

Программа SOUNDFORGEPro 13.0 позволяет проводить спектральный анализ звука – метод установления акустической структуры звука, представляющий собой сложный, непрерывно изменяющийся во времени акустический сигнал, образующийся рядом частотных составляющих с различной интенсивностью, позволяющий определять пиковое значение уровня звука и частоты в любом интересующем исследователя диапазоне.

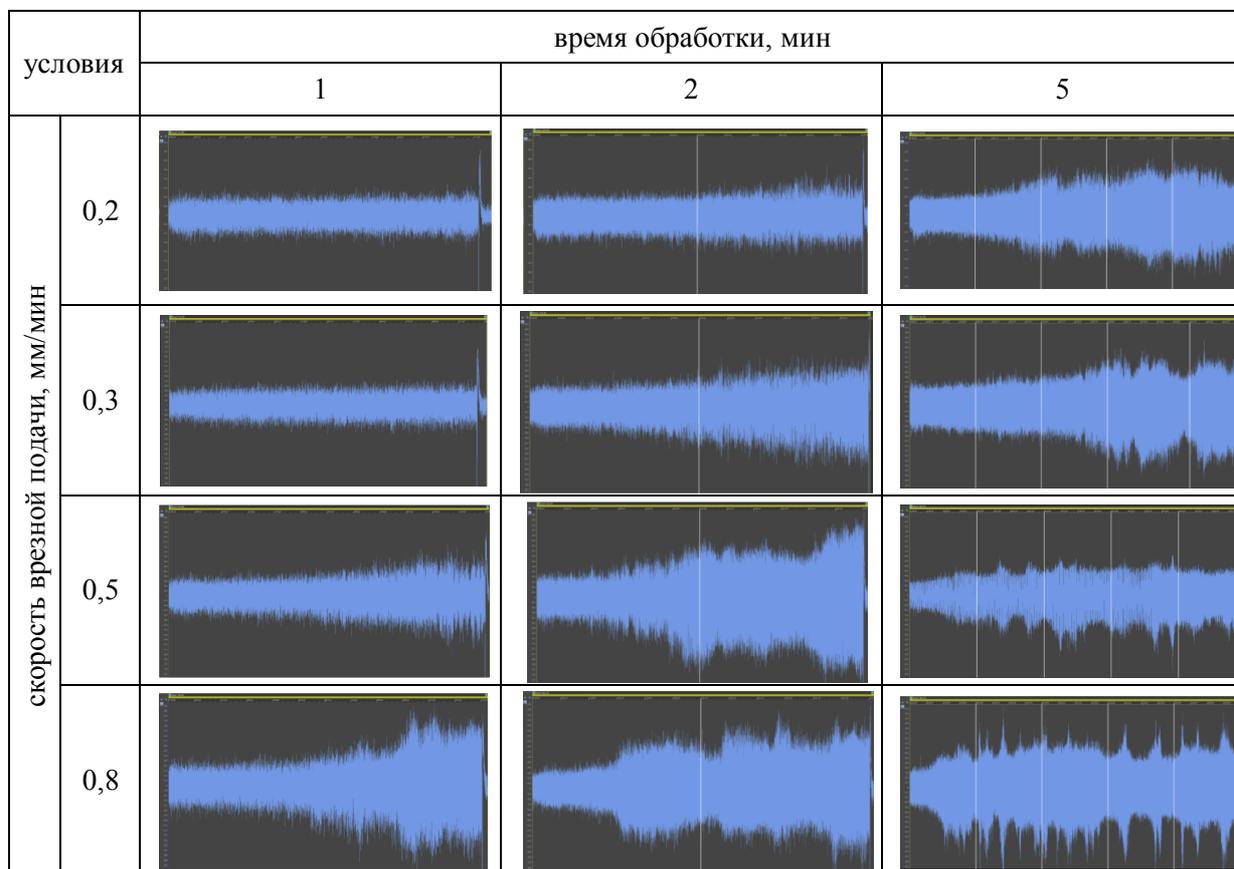
Достоверность экспериментальных данных, отражающих зависимость звука от технологических условий шлифования, во многом зависит от определения информативного диапазона частот

Технология

ты акустических колебаний. Авторами работ [14–17] установлен диапазон информативных частот, в рамках которого целесообразно исследовать изменения интенсивности звука, поскольку именно на этих частотах происходят изменения акустического параметра, сопровождающие процесс абразивной обработки. Таким диапазоном является интервал от 708 Гц до 845 Гц.

Таблица 1

Акустические диаграммы КНВШ для различных технологических условий



Интенсивность звука (дБ) во времени обработки характеризуется постепенным, но неравномерным ростом. Неравномерность роста объясняется большим количеством факторов, влияющих на процесс шлифования. Такие явления, как самозатачивание ШК, упругие деформации некоторых узлов технологической системы, случайный характер вырыва зерен и прочие, достаточно трудно учесть в рамках проводимого эксперимента несмотря на то, что их совокупное влияние заметно.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости звукового давления (мкПа) от времени обработки на различных скоростях врезной подачи, на которых прослеживается общая тенденция к возрастанию звукового давления в процессе обработки. Кроме того, видно, что с ростом скорости подачи увеличение звукового давления происходит по значительно более крутой траектории, поскольку в таких условиях износ инструмента и возрастание площадок затупления абразивного зерна происходит значительно быстрее.

Таким образом, по данным эксперимента прослеживается зависимость звуковых характеристик от процесса шлифования при разной скорости врезной подачи.

Акустические диаграммы и графики на основе спектрального анализа звука, генерируемого в процессе абразивной обработки, отражают вибро-динамические свойства технологической системы и процесса снятия припуска абразивным инструментом.

Увеличение значений звукового давления в процессе обработки связано с увеличением силы резания, которая, в свою очередь, зависит от затупления (образования площадок на поверхности абразивных зерен и снижения режущей способности), стойкости (сопротивления засаливанию и

затуплению) и периода стойкости (времени работы между двумя последовательными правками) абразивного инструмента. Неравномерность роста звукового давления связана со стохастическим (случайным) характером шлифования.

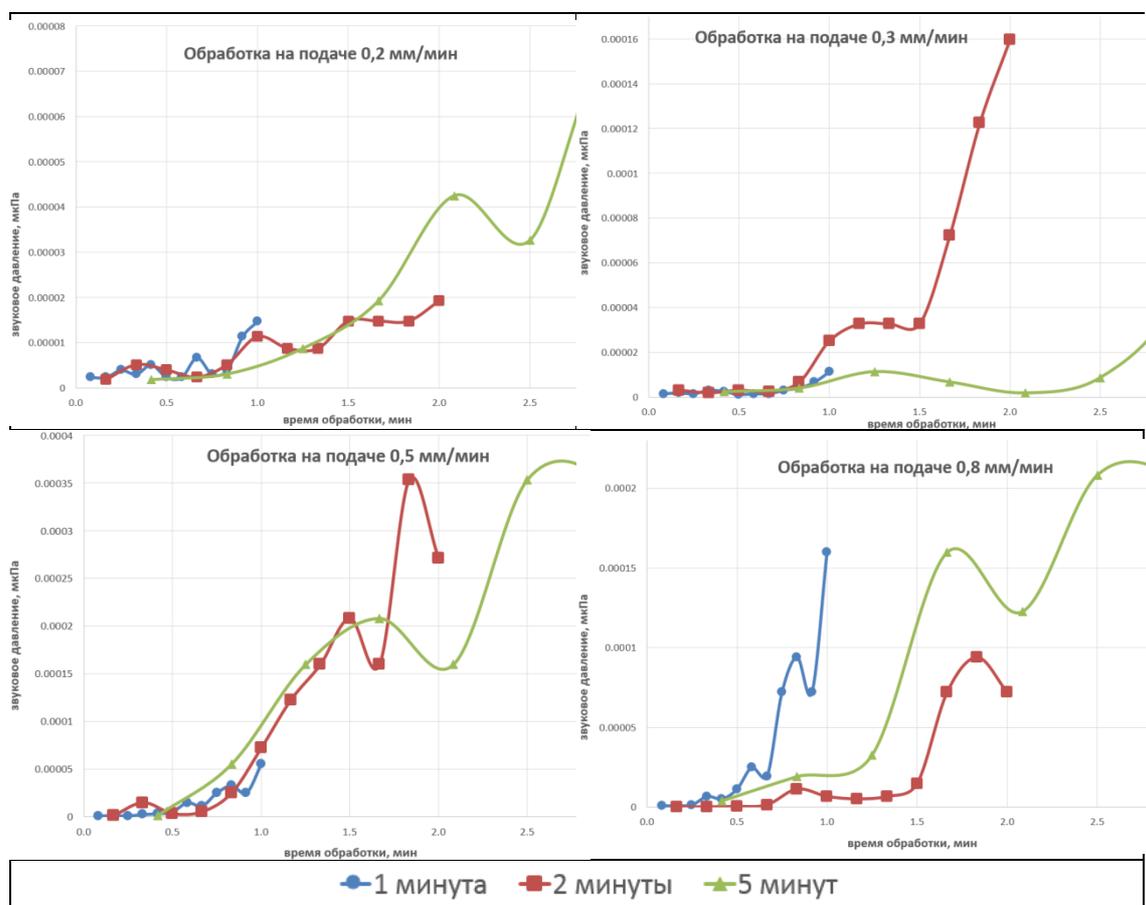


Рис. 1. Зависимости звукового давления от времени обработки для разных значений скорости врезной подачи

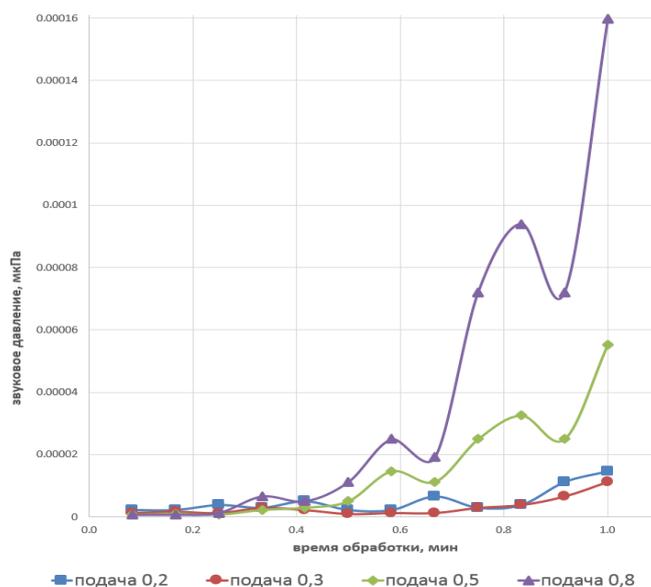


Рис. 2. Изменение звукового давления в течение 1 минуты на различных подачах

Обобщая результаты анализа полученных акустических диаграмм, можно заключить, что для каждой из диаграмм характерно разделение на три условных этапа.

Первый этап является этапом обработки профилем ШК, сформированного правкой. Продолжительность этапа разнится в зависимости от скорости подачи: чем выше скорость подачи, тем участок стабильной обработки меньше. Однако характер генерируемого звука для каждой из трех рассматриваемых подач сходный. Это выражается в относительно постоянной амплитуде звуковых вибраций и равными интервалами частот колебаний. На **втором этапе** обработки амплитуда интенсивности звука начинает резко возрастать в течение некоторого времени. То, насколько резко происходит переход, также зависит от скорости подачи. Износ абразивного зерна здесь приобретает массовый характер, значительно увеличивается среднее значение площади затупления, что в совокупности с усилением, обеспечиваемым движением подачи ШК, создает вибрацию, которая может негативно сказаться на качестве обработки. На **третьем этапе** амплитуда вибраций продолжает возрастать до окончания опыта, однако рост имеет значительно более плавный характер в сравнении со вторым этапом. Степень затупления зерна продолжает возрастать, что приводит к стабильно высокому показателю амплитуды вибраций.

Возникновение звуковых колебаний в упругой воздушной среде в рамках рассматриваемого исследования обусловлено вибрациями, возникающими при ударном взаимодействии твердых тел – абразивных зерен ШК и поверхности обрабатываемой заготовки. Поскольку в состоянии поверхностей ШК и заготовки в ходе процесса шлифования происходят изменения (форма зерен, качество обрабатываемой поверхности), то неизбежны изменения в характере звука, генерируемого при таком взаимодействии. Явления, сопровождающие соударения твердых тел, в том числе акустические, достаточно широко изучены и используются для исследований в различных сферах инженерной науки [18–20]. Необходимо рассмотреть характеристики качества обработанной поверхности в совокупности с показателями акустики шлифования.

Макронеровности

Различные аспекты производственного процесса, его технологические условия порождают разные вибрационные воздействия, оказывающие разного рода влияния на обрабатываемую поверхность заготовки [21]. Такие влияния, в частности затупление ШК, проявляются на обработанной поверхности в виде шероховатостей, волнистостей и отклонений формы (ГОСТ 24642-81).

Волнистость – параметр, который не регламентирован ГОСТом. Визуально волнистость может быть выявлена разным преломлением света на разных участках поверхности, вызвана низкочастотными вибрациями технологического оборудования, характеризуется шагом и высотой волнистости (S_w , W_z). Если отношение шага к высоте неровностей находится в пределах от 50 до 1000, то такие отклонения поверхности называют волнистостью, если отклонения менее 50 – шероховатостью, если более 1000 – отклонениями формы (огранкой) [22].

Для определения величины отклонений формы шлифованных образцов были произведены измерения отклонения от круглости с использованием координатно-измерительной машины (шестиосевая КИМ-1000, страна-производитель – Россия, 2009 г. в.). Определение отклонений производилось с помощью измерительного наконечника методом сканирования с дискретностью 0,1 мм. В результате были получены данные о координатах облака точек для каждого образца с их дальнейшей обработкой, анализом и интерпретацией.

Обработка полученных данных позволила сформировать полярные лепестковые диаграммы разностей длин радиусов, проведенных из центра окружности к каждой точке, формирующей реальный профиль шлифованного образца (рис. 3).

Анализ полученных круглограмм показывает, что разбег значений радиусов образцов имеет неравномерный характер. Неравномерность увеличивается с увеличением скорости радиальной подачи и с увеличением времени обработки.

Помимо этого, располагая данными о максимальном и минимальном измеренном радиусе, для каждого образца становится возможным определить параметр отклонения от круглости Δ_0 и его изменение в ходе шлифования (рис. 4). А также с помощью данных акустических диаграмм на графике проведены кривые зависимости интенсивности звука от времени.

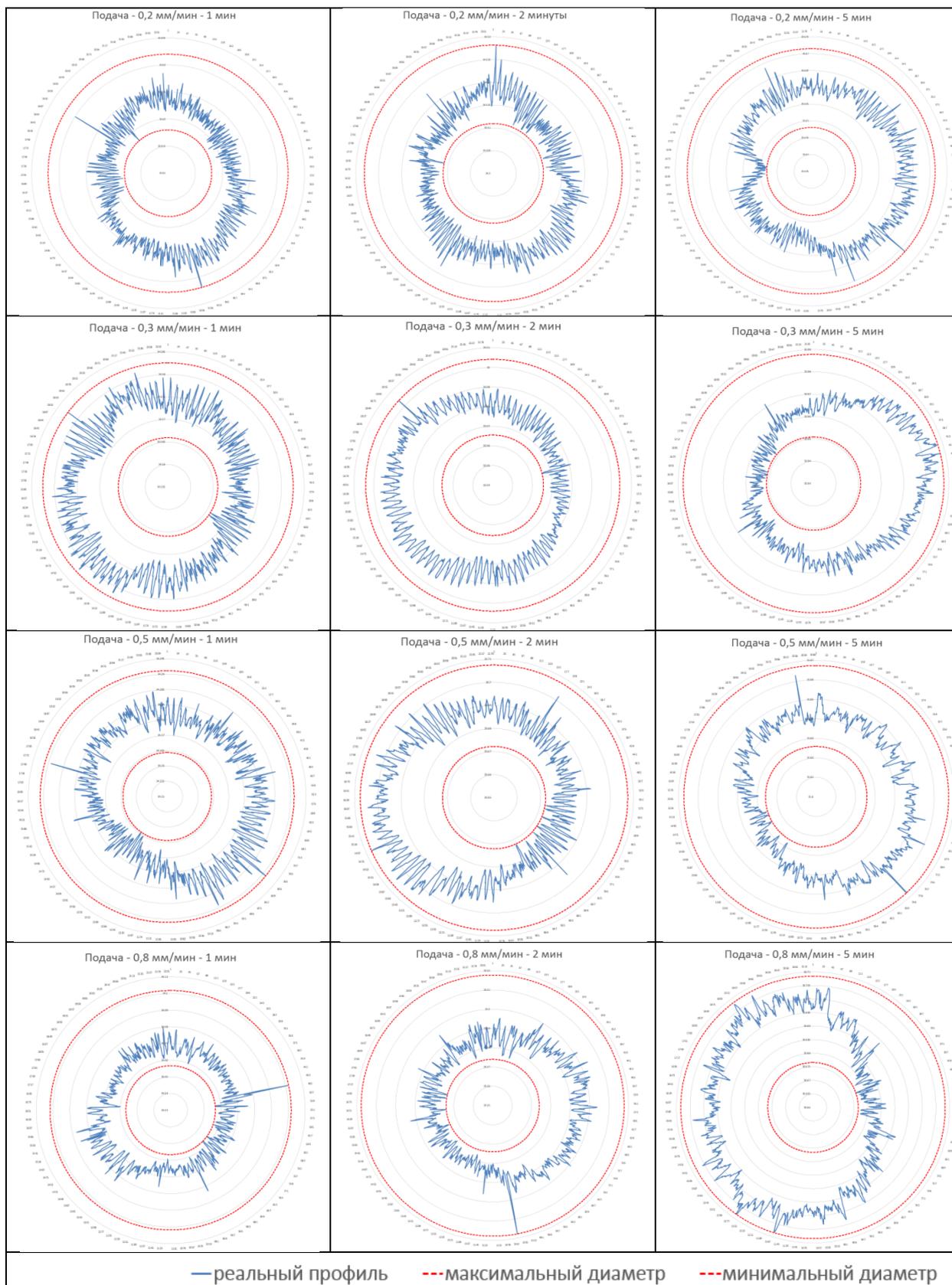


Рис. 3. Круглограммы

Величина отклонений стабильно возрастает по ходу протекания процесса обработки, что говорит о том, что по достижении определенного значения времени обрабатываемая поверхность

перестанет удовлетворять установленному требованию отклонений формы и приведет к появлению брака. Кривые отклонений пересекают горизонтальные (пунктирные) линии, обозначающие величину допусков на размер, соответствующие различным квалитетам точности для диаметрального размера шлифованного образца ($R_{cp} = 32,966$ мм). Видно, например, что при шлифовании образца со скоростью врезной подачи 0,2 мм/мин величина отклонения от круглости начинает превышать допуск, соответствующий квалитету h9 после 2,6 минут обработки. Кроме того, изменения интенсивности звука имеют схожий характер и тенденцию к росту. Наблюдаются аналогичные участки на кривых отклонений и интенсивности в интервале 1–2,5 мин., на которых происходит более резкие изменения функции, после которых рост продолжается более плавно.

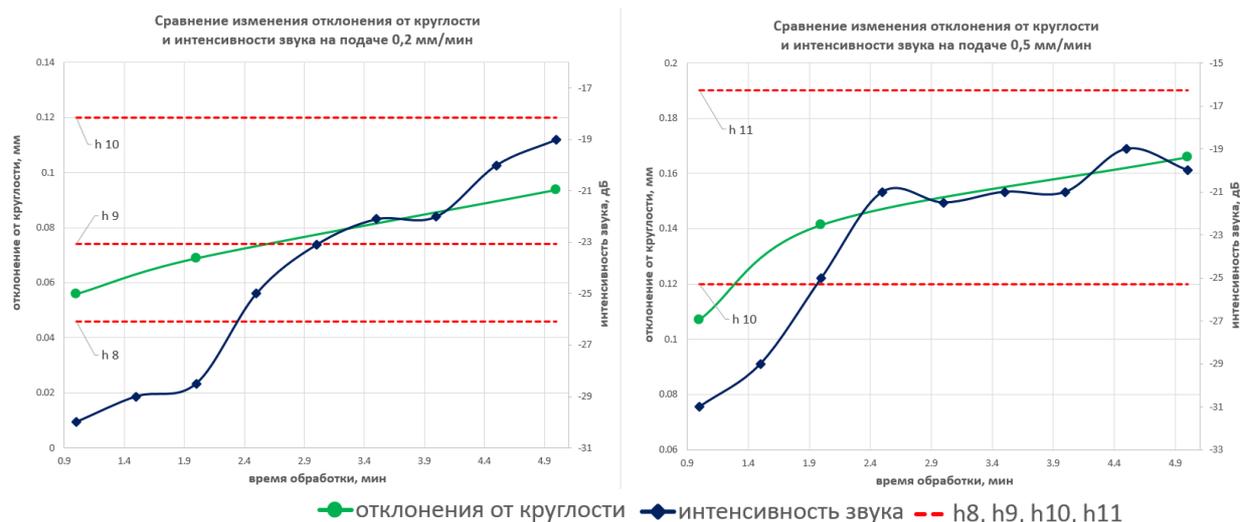


Рис. 4. Сравнение характера кривых отклонения от круглости и интенсивности звука во времени для образцов, обработанных на подачах 0,2 мм/мин и 0,5 мм/мин

Акустика и макронеровности

Рассматривается образец, шлифованный со скоростью врезной подачи 0,3 мм/мин в течение 5 минут.

Значение скорости резания, обеспечиваемое шлифовальным станком 3М151Ф2, согласно методике проводимого эксперимента равно 50 м/с, число оборотов инструментального шпинделя при этом составляет 1590 об/мин. Следовательно, ШК в процессе абразивной обработки совершает один полный оборот за 0,038 секунды.

На рис. 5 изображена акустическая диаграмма интенсивности звука во времени. Рассмотрев данную зависимость на промежутках времени, сопоставимых со временем одного оборота ШК, можно наблюдать циклично повторяющиеся участки возрастания и убывания интенсивности звука – низкочастотная волна – 28,6 Гц. Помимо этого наблюдаются колебания более низкой частоты, связанные с вибро-динамическим характером самого процесса шлифования (несбалансированность ШК, неуравновешенность электродвигателей) – высокочастотная волна – 714 Гц.

Размеры одного цикла низкочастотной волны по шкале времени в среднем близки к значению оборота ШК, что позволяет говорить о связанности этих параметров.

На рис. 6 отдельно выделен участок звуковой волны, соответствующий времени оборота ШК.

Рассмотренная высокочастотная составляющая звуковой волны характеризует изменения акустического параметра, сопровождающие процесс абразивной обработки, поскольку данная частота входит в диапазон информативных частот от 708 Гц до 845 Гц (см. п. Акустика).

Также в соответствии с методикой эксперимента скорость вращения заготовки в центрах $v_k = 25$ м/мин, частота оборотов, соответственно, $n = 122,4$ об/мин, один полный оборот заготовка совершает за 0,49 сек. Значит, за время, требуемое ШК на совершение полного оборота (0,038 сек.), образец совершает 0,08 оборота, что составляет $28,75^\circ$ (рис. 7).

При изучении поверхности образца с применением малого инструментального микроскопа были получены изображения (рис. 8), на которых имеют место макронеровности, визуально представляющие собой грани, отражающие свет под разными углами. Применяв шкалу, которой снаб-

жен микроскоп, удалось определить среднюю ширину грани данных макронеровностей, которая составила 2,5 мм.



Рис. 5. Характер звуковой волны

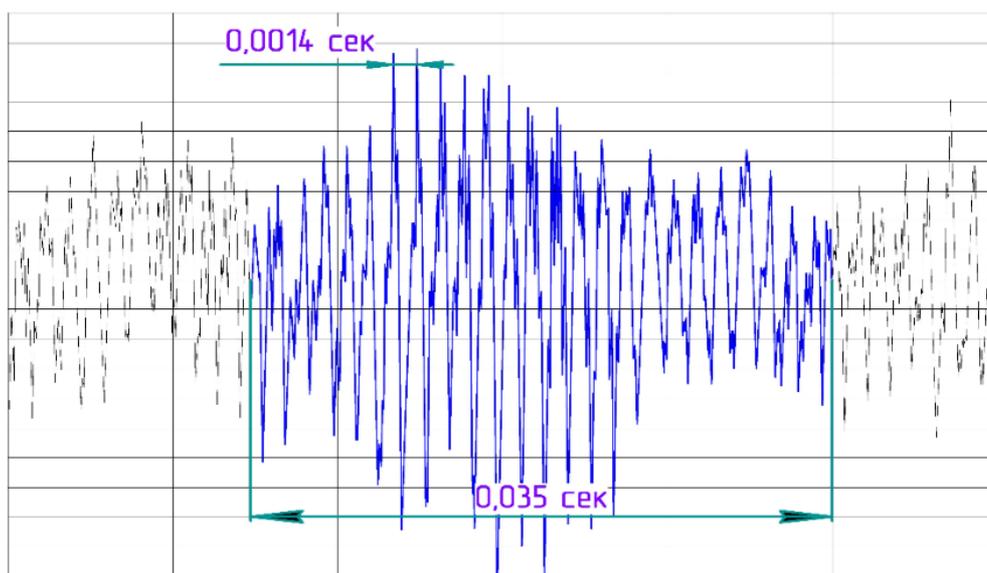


Рис. 6. Высокочастотная волна, низкочастотная волна

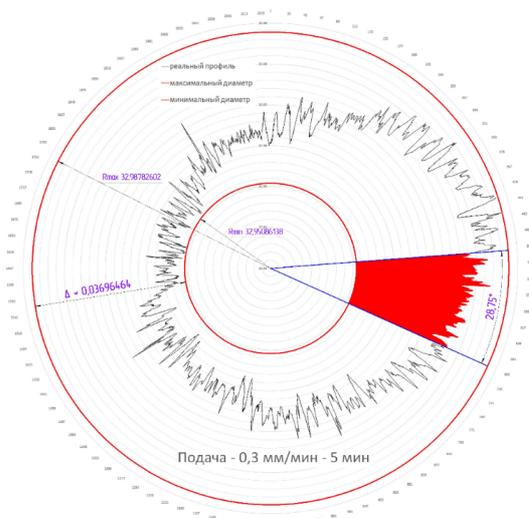


Рис. 7. Круглограмма образца, шлифованного в течение 5 минут на подаче 0,3 мм/мин

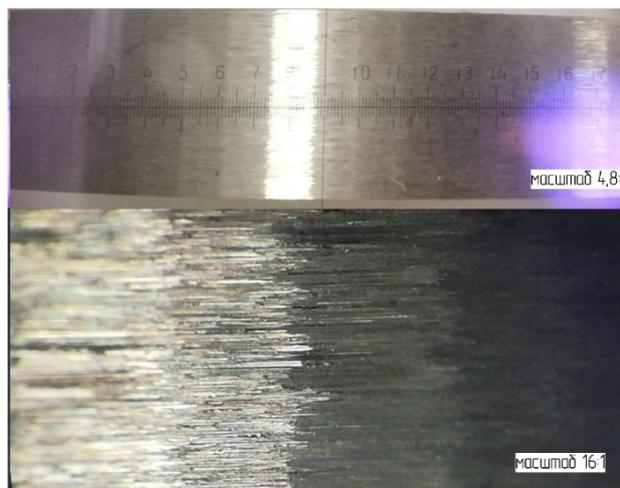


Рис. 8. Макронеровности шлифованной поверхности с увеличением в 4,8 раза и в 16 раз

Чтобы идентифицировать порядок отклонений, необходимо определить отношение S_w/W_z в зависимости от времени обработки: 1 минута – $S_w/W_z = 445$; 2 минуты – $S_w/W_z = 187$; 5 минут – $S_w/W_z = 291$. Круглограмма преобразуется в график, построенный в декартовой системе координат, где по оси абсцисс отложена длина периметра образца в мм, по оси ординат – координаты точек, характеризующих длины радиус-векторов, проведенных из центра окружности в мкм. Для трех образцов, шлифованных на подаче 0,3 мм/мин, определены параметры волнистости и сведены с акустическими диаграммами на рис. 9.

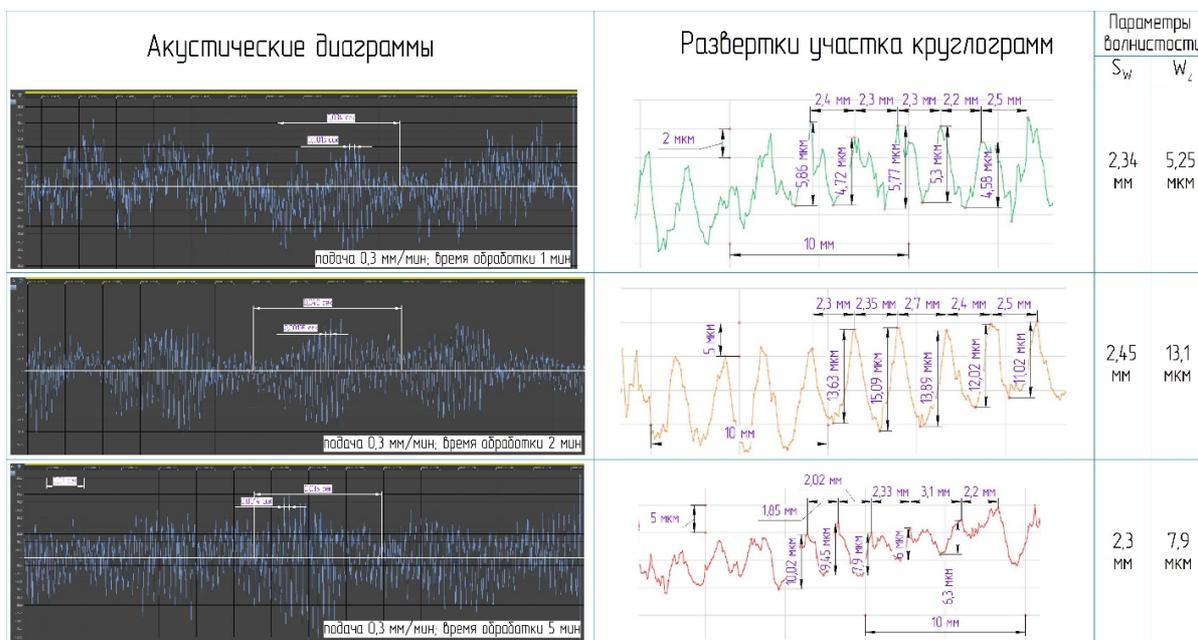


Рис. 9. Сравнение акустических диаграмм и измеренных величин макронеровностей:

Из этого следует, что рассматриваемые макронеровности классифицируются как волнистость поверхности. По анализу разверток круглограмм удалось установить, что значения шага волнистости по мере обработки не имеют значительных изменений, то есть сформированные в определенный момент времени площадки (границы) не изменяются по ширине, и можно утверждать, что их количество для одного образца одинаково (или имеет незначительные изменения) на протяжении обработки. Высота волнистости, напротив, не имеет постоянного значения и меняется в процессе обработки как в меньшую сторону, так и в большую. Показатель S_w/W_z , имеющий прямую зависимость от высоты волнистости, меняется пропорционально.

Анализ акустических диаграмм подтверждает, что пульсирующий характер работы ШК, вызванный его несбалансированностью, отражается на характеристике звука. Видно, что на каждой из трех диаграмм (1 мин, 2 мин, 5 мин) имеет место закономерно повторяющийся участок низкочастотной волны. Причем значения периодов волн близки по значениям между собой (0,034 сек., 0,04 сек., 0,035 сек.) и рассчитанному времени полного оборота ШК. Низкочастотная волна также имеет близкое значение периода на всех диаграммах, а ее частота соответствует информативному диапазону на каждой стадии обработки (769 Гц, 740 Гц, 714 Гц).

Значение интенсивности пиковых значений звука для первой минуты составило –35,1 дБ, для второй – –23,1 дБ, для пятой – –24 дБ. Это означает, что интенсивность в промежутке от первой до второй минуты возросла в 1,52 раза, а от второй до пятой минуты уменьшилась в 1,04 раза, что отражает устанавливающийся процесс резания абразивным инструментом. Затупление абразивных зерен происходит в начале обработки (см. табл. 1), после которого значительного роста интенсивности звука не наблюдается, однако в ходе дальнейшей обработки возникают и постепенно учащаются резкие возрастания амплитуды интенсивности, сменяющиеся снижением амплитуды к исходным значениям. Данное явление частично объясняется свойством самозатачиваемости абразивных зерен инструмента.

Выводы

1. Прослеживается качественная зависимость акустики процесса КНВШ от скорости врезной подачи, а также от времени обработки.

Рост акустических характеристик происходит постоянно и неравномерно: имеют место участки затухания и резкого роста, что связано со стохастическим характером шлифования, большим количеством малых и трудноучитываемых воздействий, в совокупности оказывающих заметное влияние.

Величины интенсивности звука и звукового давления возрастают на протяжении всего процесса обработки. Показано условное разделение процесса КНВШ на три этапа, связанное с состоянием рабочей поверхности ШК, нашедшее отражение на акустических диаграммах для каждого образца.

С ростом скорости подачи кривые звуковых характеристик возрастают с большей скоростью, так как фактор подачи оказывает влияние на состояние ШК: ускоренный рост площадок затупления на абразивном зерне, снижение периода стойкости ШК.

2. Разница между максимальным и минимальным значением радиуса образцов, определяющая параметр отклонения от круглости, возрастает с увеличением скорости радиальной подачи и с увеличением времени обработки. Графики отклонений от круглости коррелируют с графиками интенсивности звука, имеют общую тенденцию увеличиваться, следовательно, акустическая характеристика позволяет дать косвенную оценку отклонений от круглости без прерывания процесса шлифования.

Характер неровностей образцов, показанный на круглограммах, показывает, что при длительной обработке с высокой скоростью подачи текстура обработанной поверхности приобретает все более неупорядоченный вид.

3. Показано наличие двух составляющих звуковой волны – низкочастотной волны и высокочастотной волны. Низкочастотная (25–30 Гц) характеризует несбалансированность ШК, отражает акустику при каждом обороте круга. Высокочастотная волна (714–770 Гц) непосредственно характеризует участки спектральной диаграммы звука, на которых происходят изменения (рост звукового давления) в процессе КНВШ.

Неровности образцов идентифицированы как волнистость. Значение шага S_w волнистости не имеет значительных изменений во времени, составляет 2,3–2,5 мм, что соответствует значениям, наблюдаемых через микроскоп. Высота W_z волнистости меняется в процессе обработки как в меньшую, так и в большую сторону. Это связано с динамическими изменениями рабочей поверхности ШК, происходящими в процессе снятия припуска. Условный первый этап, занимающий в зависимости от величины подачи от 0,5 до 2,5 минут, связан с обработкой «острым» зерном, сформированным правкой. При этом каждое зерно имеет несколько режущих кромок, площадки затупления отсутствуют ($W_z = 5,25$ мкм). На втором этапе происходит приработка, появление площадок затупления. Здесь имеет место наибольшее значение $W_z = 13,1$ мкм, поскольку одна сформированная более массивная кромка единичного зерна способна глубже внедряться в материал заготовки, при этом не подвергаться сколам. На третьем этапе продолжают увеличиваться площадки затупления, происходит перенос частиц шлама на рабочую поверхность абразивного инструмента – засаливание. В связи с этим уменьшается режущая способность ШК, параметр W_z снижается (7,9 мкм).

В какой-то мере этому соответствует поведение интенсивности звука на протяжении обработки, которая также имеет значительный рост на первом этапе (возросла в 1,52 раза) и незначительное снижение значений на последующем этапе (уменьшилась в 1,04 раза).

4. Применение метода опосредованной оценки периода стойкости ШК посредством анализа акустики процесса шлифования имеет перспективы для автоматизированного производства с применением оборудования с ЧПУ. Внедрение акустических датчиков в технологическую систему позволит проводить текущую диагностику режущей способности ШК – определение периода стойкости ШК конкретной марки для конкретных технологических условий. При необходимости управляющая программа на основании акустических данных будет вводить корректировку факторов обработки (скорости подачи и числа оборотов заготовки), что позволит расширить возможности обработки, повысить универсальность в условиях многономенклатурного производства, а также увеличить производительность шлифования и уменьшить процент брака.

Литература

1. *Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Ч. 3: Протяжные, шлифовальные и доводочные станки.* – 3-е изд. М.: ЦБНТ, 1978. – С. 105–360.
2. *Стратиевский, И.Х. Абразивная обработка: справочник / И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев.* – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.: ил.
3. *Общемашиностроительные нормативы режимов резания и норм времени для работы на шлифовальных станках.* – М.: ЦБНТ, 1978. – 358 с.
4. *Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / под ред. С.Н. Корчака.* – Челябинск: АТОКСО, 2007. – 384 с.
5. *Estimation of Dynamic Grinding Wheel Wear in Plunge Grinding / M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen et al. // Procedia CIRP.* – 2017. – Vol. 58. – P. 422–427. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247
6. *Pandiyar, V. In-Process Surface Roughness Estimation Model For Compliant Abrasive Belt Machining Process / V. Pandiyar, T. Tjahjowidodo, M. P. Samy // Procedia CIRP.* – 2016. – Vol. 46. – P. 254–257. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.126
7. *Modelling of the grinding wheel structure depending on the volumetric composition / F. Klocke, S. Barth, Ch. Wrobel et al. // Procedia CIRP.* – 2016. – Vol. 46. – P. 276–280. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.066
8. *Performance Enhancement of Cylindrical Grinding Process with a Portable Diagnostic System / R. Vairamuthu, B.M. Bhushan, R. Srikanth, N.R. Babu // Procedia Manufacturing.* – 2016. – Vol. 5. – P. 1320–1336. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.103
9. *Подураев, В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В.Н. Подураев, А.А. Барзов, В.А. Горелов.* – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
10. *In-process grinding monitoring by acoustic emission / P.R. Aguiar, P.J.A. Serni, E.C. Bianchi, F.R.L. Dotto // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Que.* – 2004. – P. V-405. DOI: 10.1109/ICASSP.2004.1327133
11. *Weingaertner, W.L. A method to determine the grinding wheel's topography based on acoustic emission / W.L. Weingaertner, A. Boaron // International Journal of Abrasive Technology (IJAT).* – 2012. – Vol. 5, № 1. – P. 17–32. DOI: 10.1504/IJAT.2012.046826
12. *Han, X. Analysis of acoustic emission in precision and high-efficiency grinding technology / X. Han, T. Wu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2013. – Vol. 67. DOI: 10.1007/s00170-012-4626-x
13. *Никифоров, И.П. Модель оптимизации периода стойкости шлифовального круга / И.П. Никифоров, Е.Н. Иванов // Труды Псковского политехнического института.* – 2010. – № 13. – С. 256–260.
14. *Гурьянихин, В.Ф. Влияние режимов шлифования на интенсивность акустического сигнала и показатели процесса круглого наружного врезного шлифования / В.Ф. Гурьянихин, Д.В. Аринин // Вестник Ульяновского гос. техн. ун-та.* – 2000. – № 4. – С. 79–83.
15. *Аринин, Д.В. Исследование режущей способности шлифовальных кругов при круглом наружном врезном шлифовании с использованием информации по низкочастотному акустическому сигналу / Д.В. Аринин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2002. – Т. 305, № 2. – С. 179–182.
16. *Гурьянихин, В.Ф. Управление процессом круглого наружного врезного шлифования с использованием акустического сигнала / В.Ф. Гурьянихин, В.В. Агафонов, А.А. Панков // СТИН.* – 2009. – № 2. – С. 35–40.
17. *Агафонов, В.В. Повышение эффективности круглого наружного врезного шлифования путем управления скоростью подачи по интенсивности звукового сигнала: автореф. дисс. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук. / В.В. Агафонов.* – Ульяновск: Типография УлГТУ, 2010. – 19 с.
18. *Wang, F. Modeling and analysis of an impact-acoustic method for bolt looseness identification / F.I. Wang, S.Ch.M. Ho, G. Song // Mechanical Systems and Signal Processing.* – 2019. – Vol. 133. – № 106249. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106249

19. *Vibration and acoustic signal characteristics of solid particles carried in sand-water two-phase flows* / K. Wang, G. Liu, Y. Li et al. // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 345. – P. 159–168.

20. *Gemmeren, V. Modeling the acoustic emissions generated during dynamic fracture under bending* / V. Gemmeren, T. Graf, J. Dual // *International Journal of Solids and Structures*. – 2020. – Vol. 203. – P. 84–91.

21. *Raja J. Recent advances in separation of roughness, waviness and form* / J. Raja, B. Muralikrishnan, Sh. Fu // *Precision Engineering*. – 2002. – Vol. 26, Iss. 2. – P. 222–235. DOI:10.1016/S0141-6359(02)00103-4

22. *Молотников, В.Я. Техническая механика: учебное пособие* / В.Я. Молотников – СПб.: Изд-во «Лань», 2017. – 476 с.

Ардашев Дмитрий Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ardashevdy@susu.ru.

Жуков Александр Сергеевич, магистрант кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», инженер-исследователь Управления научной и инновационной деятельностью, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, 89127773160@mail.ru.

Чаплыгин Борис Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, email: chaplyginba@susu.ru.

Поступила в редакцию 11 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200405

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE GRINDING PROCESS USING ACOUSTIC CHARACTERISTICS

D.V. Ardashev, ardashevdy@susu.ru,

A.S. Zhukov, 89127773160@mail.ru,

B.A. Chaplygin, chaplyginba@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper considers the results of an experimental study of the external circular plunge-cut grinding process and the accompanying sound phenomena. Acoustic vibrations generated by the abrasive process are an indirect parameter that characterizes the state of the cutting process. This information is useful for controlling the grinding process and planning the technological process. The advantage of the method of accounting and forecasting the current state of the technological system during grinding, based on the use of acoustic data, is the possibility of its application without interrupting the production process.

The subject of experimental research is the acoustic signal that occurs during grinding. The purpose of the work is to conduct an experimental study of the dependence of the sound parameters of the grinding process on the technological conditions of the operation and their relationship with the parameters of the processing quality.

The main methods used to achieve a designated goal are experiment, measurement and analysis.

The experiment made it possible to obtain the data necessary for further processing. Registration of the sound signal generated during grinding at different feed rates is the main task of the experimental experiments. With the help of contact measurements, the real profile of the ground samples was determined, which is the most important stage for determining the relationship between the characteristics of the grinding process and the quality indicators of the processed surface. The analytical method was used to process the obtained experimental and measurement data. With its help, from a wide range, informative sound frequencies were identified, reflecting changes in the grinding process over time. The analysis of the measurement data made it possible

to evaluate the deviation of the polished samples from roundness, depending on the technological conditions of the operation, to determine the parameters that have the greatest influence on this criterion of the processing quality.

As a result of the study, a relationship was established between the acoustic characteristic - sound pressure and the quality parameter of the polished surface – deviation from roundness.

The knowledge gained about the sound characteristic of the grinding process can be applied for a more rational use of the resource of an abrasive tool through predicting the life of the grinding wheel.

Keywords: acoustic analysis of sound, spectral analysis of sound, grinding process, out of roundness, Tool life.

References

1. *Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya dlya tekhnicheskogo normirovaniya rabot na metallorezhushchih stankah. Ch. 3: Prot'yazhnyye, shlifoval'nye i dovodochnye stanki.* [General Machine-Building Standards of Cutting Conditions for Technical Regulation of Work on Metal-Cutting Machines. Part 3: Broaching, Grinding and Lapping Machines] Moscow, CBNT, 1978, pp. 105–360;
2. Stratievskij I.H., Yur'ev V.G., Zubarev Yu.M. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive Processing: handbook] Moscow, Mashinostroenie, 2010, 352 p.
3. *Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya i norm vremeni dlya raboty na shlifoval'nyh stankah.* [General Machine-Building Standards for Cutting Conditions and Time Standards for Working on Grinding Machines] Moscow, CBNT, 1978. 358 p.
4. Korchak S.N. (Ed.) *Rezhimy rezaniya na raboty, vpolnyaemye na shlifoval'nyh i dovodochnyh stankah s ruchnym upravleniem i poluavtomatah: Spravochnik* [Cutting Conditions for Work Performed on Grinding and Lapping Machines with Manual Control and Semiautomatic Devices: Handbook]. Chelyabinsk: ATOKSO, 2007. 384 p.
5. 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
6. Pandiyan V., Tjahjowidodo T., Samy M.P. In-Process Surface Roughness Estimation Model For Compliant Abrasive Belt Machining Process. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 254–257. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.126
7. Klocke F., Barth S., Wrobel Ch., Weiss M., Mattfeld P., Brakhage K.-H., Rom M. Modelling of the Grinding Wheel Structure Depending on the Volumetric Composition. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 276–280 doi: 10.1016/j.procir.2016.04.066
8. Vairamuthu R., Bhushan Brij M, Srikanth R, Babu N. Ramesh Performance Enhancement of Cylindrical Grinding Process with a Portable Diagnostic System. *Procedia Manufacturing*, 2016, Vol. 5, pp. 1320–1336 doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.103
9. Podurayev V.N., Barzov A.A., Gorelov V.A. *Tekhnologicheskaya diagnostika rezaniya metodom akusticheskoy emissii* [Technological Diagnostics of Cutting by the Method of Acoustic Emission]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1988, 56 p.
10. Aguiar P.R., Serni P.J.A., Bianchi E.C., Dotto F.R.L. In-process Grinding Monitoring by Acoustic Emission. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Que.* 2004, pp. V-405. doi: 10.1109/ICASSP.2004.1327133
11. Weingaertner W.L., Boaron A. A Method to Determine the Grinding Wheel's Topography Based on Acoustic Emission. *International Journal of Abrasive Technology (IJAT)*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 17–32. doi: 10.1504/IJAT.2012.046826
12. Han X., Wu T. Analysis of acoustic emission in precision and high-efficiency grinding technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67. doi: 10.1007/s00170-012-4626-x
13. Nikiforov I.P., Ivanov E.N. [Model for Optimizing the Life Cycle of a Grinding Wheel]. *Proceedings of the Pskov Polytechnic Institute*, 2010, no. 13, pp. 256–260 (in Russ.)
14. Guryanikhin V.F., Arinin D.V. [Influence of Grinding Modes on the Intensity of the Acoustic Signal and Indicators of the Process of Circular External Plunge-Cut Grinding]. *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*, 2000, no. 4, pp. 79–83. (in Russ.)

15. Arinin D.V. [Investigation of the Cutting Ability of Grinding Wheels During External Circular Plunge-Cut Grinding Using Information on a Low-Frequency Acoustic Signal]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 2002, vol. 305, no. 2, pp. 179–182. (in Russ.)
16. Guryanikhin V.F., Agafonov V.V., Pankov A.A. [Control of the Process of External Circular Plunge-Cut Grinding Using an Acoustic Signal]. *STEEN*. 2009. No. 2, pp. 35–40. (in Russ.)
17. Agafonov V.V. *Povysheniye effektivnosti kruglogo naruzhnogo vreznogo shlifovaniya putem upravleniya skorost'yu podachi po intensivnosti zvukovogo signala: Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing the Efficiency of External Circular Plunge-Cut Grinding by Controlling the Feed Rate by the Intensity of the Sound Signal: Abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Ulyanovsk: Printing house of UISTU, 2010, 19 p.
18. Wang F., Ho S. Ch. M., Song G. Modeling and Analysis of an Impact-Acoustic Method for Bolt Looseness Identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 133, Number Article 106249; DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.106249
19. Wang K., Liu G., Li Y., Qin M., Wang J., Wang G., Mei D. Vibration and acoustic signal characteristics of solid particles carried in sand-water two-phase flows. *Powder Technology*, 2019, vol. 345, pp. 159–168.
20. Gemmeren V., Graf T., Dual J. Modeling the Acoustic Emissions Generated During Dynamic Fracture under Bending. *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 203, pp. 84–91.
21. Raja J., Muralikrishnan B., Fu Sh. Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form. *Precision Engineering*. 2002. Vol. 26, iss. 2, pp. 222–235. DOI:10.1016/S0141-6359(02)00103-4
22. Molotnikov V.Ya. *Tekhnicheskaya mekhanika: Uchebnoye posobie*. [Technical Mechanics: A Study Guide.] St. Petersburg. Lan Publishing House, 2017. 476 p.

Received 11 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ардашев, Д.В. Экспериментальное исследование процесса шлифования с применением акустических характеристик / Д.В. Ардашев, А.С. Жуков, Б.А. Чаплыгин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 45–59. DOI: 10.14529/engin200405

FOR CITATION

Ardashev D.V., Zhukov A.S., Chaplygin B.A. Experimental Research of the Grinding Process Using Acoustic Characteristics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 45–59. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200405
