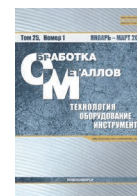




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Экспериментальное исследование динамики процесса механообработки концевыми сфероцилиндрическими фрезами

Михаил Гимадеев ^{a,*}, Андрей Ли ^b, Вера Беркун ^c, Вадим Стельмаков ^d

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, 680035, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>, 009063@pnu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9907-4936>, 011864@pnu.edu.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-5249-2612>, 2015103121@pnu.edu.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>, 009062@pnu.edu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914:517.443:53.082.4

История статьи:

Поступила: 07 ноября 2022
 Рецензирование: 14 января 2023
 Принята к печати: 21 января 2023
 Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:

Сфероцилиндрическая фреза
 Шероховатость поверхности
 Вибрация
 Корреляционный анализ
 Регрессионный анализ
 Онлайн-мониторинг
 Наклон инструмента

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Хабаровского края в рамках краевого конкурса на предоставление грантов в форме субсидий из краевого бюджета на реализацию проектов в области фундаментальных, технических, гуманитарных и общественных наук. Грант № 93С/2022 на тему «Повышение эффективности работы технологического оборудования при механообработке за счет онлайн-мониторинга акустического сигнала».

Благодарности:

Авторы выражают благодарность А.В. Никитенко, кандидату технических наук, доценту кафедры технологическая информатика и информационные системы (ФГБОУ ВО ТОГУ, г. Хабаровск) за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований в учебно-производственном центре CAD/CAM технологий. Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Ввиду значительного количества факторов, влияющих на изменение свойств динамической системы для обеспечения высокого качества получаемого продукта, выбираются чрезмерно консервативные условия обработки. Это ограничивает эффективность процесса и приводит к повышению себестоимости продукции. Соответственно необходимы современные подходы, которые позволяют диагностировать текущее состояние обработки и вовремя принимать решение о замене инструмента, коррекции или изменении управляющей программы. Значение проводимого исследования состоит в предложении подхода к контролю механообработки, основанного на методе мониторинга процесса фрезерования в реальном времени, для определения возникающих погрешностей обработки, прогнозирования потенциальных проблем и увеличения продолжительности безотказной работы. **Предмет.** В статье рассматриваются особенности работы системы мониторинга в реальном времени с учетом фильтрации звуковой волны, минимизации шероховатости поверхности при механообработке одно- и двухлезвийным инструментом. **Цель работы** – определить влияние ориентации наклона сфероцилиндрического инструмента на величину шероховатости поверхности с использованием мониторинга в реальном времени в процессе фрезерования на технологическом оборудовании с ЧПУ. **Методика исследований.** В исследовании приводятся методы корреляционного и регрессионного анализа. Расчетные данные получены за счет виброакустической диагностики и измерены в диапазоне значений переменного угла наклона поверхности для одно- и двухлезвийного инструмента на основе положений теории колебаний и виброакустической диагностики, теории резания, цифровой обработки и цифровой фильтрации сигналов. **Результаты и обсуждения.** Экспериментальные данные, полученные при механообработке, позволили определить, что увеличение угла наклона однозубой фрезы практически не влияет на изменение амплитудных параметров шероховатости. Значения виброакустической диагностики и шероховатости при использовании двухзубового сфероцилиндрического инструмента показывают согласованную картину с эффектами, создаваемыми углами наклона и опережения. Полученные решения задач мониторинга и анализа параметров шероховатости позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований и уточнить представление о практической реализации способа акустического мониторинга процесса резания.

Для цитирования: Экспериментальное исследование динамики процесса механообработки концевыми сфероцилиндрическими фрезами / М.Р. Гимадеев, А.А. Ли, В.О. Беркун, В.А. Стельмаков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 44–56. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56.

*Адрес для переписки

Гимадеев Михаил Радикович, к.т.н., доцент
 Тихоокеанский государственный университет,
 ул. Тихоокеанская, 136,
 680035, г. Хабаровск, Россия
 Тел.: 8 (924) 216-31-39, e-mail: 009063@pnu.edu.ru

Введение

Одним из основных направлений развития машиностроительного производства является повышение надежности механообработки пространственно-сложных поверхностей (ПСП) путем использования системы мониторинга в режиме реального времени, предназначенной для получения достоверной информации состояния процесса фрезерования и принятия необходимых управляющих решений [1–6].

Для решения задач контроля процесса фрезерования многими авторами исследуется изменение активной зоны контакта концевой фрезерного инструмента и обрабатываемой детали. Pimenov D. и др. [7] представили практические рекомендации по назначению ориентации инструмента к обрабатываемой детали с учетом динамики фрезерования для обеспечения шероховатости поверхности. Tan L. и др. [8] изучали влияние траекторий движения на износ сферического инструмента и шероховатость поверхности в процессе фрезерования. Результаты показали, что использование траектории движения снизу вверх позволяет обеспечить минимальные амплитудные параметры шероховатости, а преобладающим видом износа инструмента является адгезионный.

Вопросы, связанные с мониторингом состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях, рассмотрены в работах ученых Козочкина М.П., Сабирова Ф.С. [9]. В работе Shaffer D. и др. акустические сигналы были исследованы как способ контроля работы технологического оборудования [10]. Экспериментальным путем с различными режимами резания были статистически определены математические модели, показывающие изменение акустического сигнала для концевой фрезерования с одной режущей кромкой. Козлов А.А. и Аль-Джонид Халид в своем исследовании определили основные требования для построения диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени [11]. Chen и др. предложили систему мониторинга в реальном времени для повышения точности при производстве деталей [6] пространственно-сложной формы с компенсацией погрешностей [12]. Авторы Cheng DJ. и др. [13] исследовали влияние параметров резания на шероховатость

обрабатываемой поверхности. Clayton Cooper [14], Anayet U Patwari и др. [15] на основе акустического сигнала провели анализ корреляции параметров шероховатости поверхности с уровнем звука. Авторы Sahinoglu A. и Rafighi M. [16] исследовали влияние параметров резания на шероховатость поверхности, вибрацию, интенсивность звука технологического оборудования при механической обработке. Многими авторами предложены способы обеспечения выходных характеристик обработки за счет управления упругими деформациями инструмента относительно заготовки с учетом состояния динамической системы (ДС) [17–20].

Анализ научных работ позволил сформулировать направление данного исследования: обобщить и получить новые знания, а также уточнить факт применимости акустического комплекса, регистрирующего сигнал через воздушную среду для контроля процесса резания, с фильтрацией помех и шума в реальном времени. Цель работы – определить влияние ориентации сферического инструмента на величину шероховатости поверхности с использованием мониторинга в реальном времени процесса фрезерования на технологическом оборудовании с ЧПУ. Вместе с этим на основании эмпирических данных необходимо разработать модель зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины подачи, диаметра и ориентации инструмента с корреляцией полученных значений и виброакустической диагностики.

Методика экспериментального исследования

Механообработка проводилась в попутном направлении с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), а также на заготовках, имеющих свойства АМг6, твердосплавными сферическими концевыми фрезами с покрытием TiN диаметром $D = 8$ мм и числом зубьев $z = 1$, $z = 2$. Подача на зуб (f_z) принята равной 0,2 мм/зуб. Соотношение вылета инструмента принято $l/D = 4$, глубина резания $a_p = 0,4$ мм, боковой шаг $a_e = 0,2$ мм. Частота вращения шпинделя (n) фрезерного обрабатывающего центра DMG DMU 50 Ecoline для двузубой фрезы составляла 1500 мин^{-1} , для однозубой 3000 мин^{-1} .

Применение СОЖ является важным фактором интенсификации процесса резания, так как

твердый сплав имеет низкое сопротивление растягивающим напряжениям [21]. При использовании СОЖ на поверхностях контакта инструмента и материала заготовки образуются пленки, которые способствуют снижению адгезионного износа.

Контроль размерного износа режущего инструмента проводился при помощи контактного измерительного щупа ТТ140 фирмы Heidenhain. Точность прямолинейности при измерении параметров шероховатости прибором Surfcom 1800D составляла $\Delta = \pm (0,05 + 1,5L / 1000)$. Виброакустическая диагностика (рис. 1) осуществлялась посредством использования анализатора спектра «ZetLab 017-U2», вибродатчиков пьезоэлектрических «BC 110», микрофона «Zet BC 501» с диапазоном воспринимаемых частот 20 Hz...13 kHz и Samson Meteor Mic кардиоидной направленности с диапазоном 20 Hz...20 kHz. В качестве выходной оценки эффективности обработки использовалась шероховатость по параметру R_z (μm), виброперемещение S (μm) и амплитудно-частотная характеристика акустического сигнала A (dB), ω (Hz).

Использование конденсаторного микрофона имеет ряд преимуществ – малую неравно-

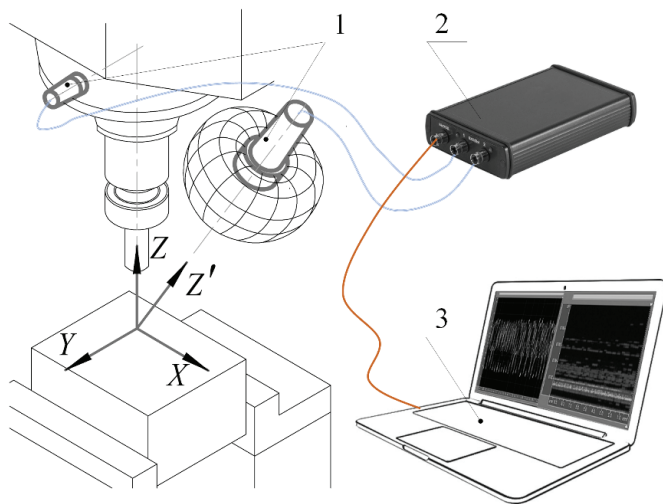


Рис. 1. Система мониторинга процесса механической обработки в реальном времени:

1 – датчик вибрации и микрофон с кардиоидной направленностью; 2 – Анализатор спектра «ZetLab 017-U2»; 3 – ПК с программным обеспечением ZETLAB (составлено авторами)

Fig. 1. Real-time monitoring in milling:

1 – Vibration sensor and microphone with cardioid orientation; 2 – Spectrum Analyzer «ZetLab 017-U2»; 3 – PC with ZETLAB software (formulated by the authors)

мерность частотной характеристики, низкий уровень нелинейных и переходных искажений, высокую чувствительность и низкий уровень собственных шумов. Особое внимание стоит уделять повышению качества диагностического сигнала, который состоит из суммы спектра «полезного» сигнала и большого числа неодинаковых по уровню шумов, исходящих от разнообразных объектов. Для шумоподавления в реальном времени использовалось спектральное вычитание (рис. 2).

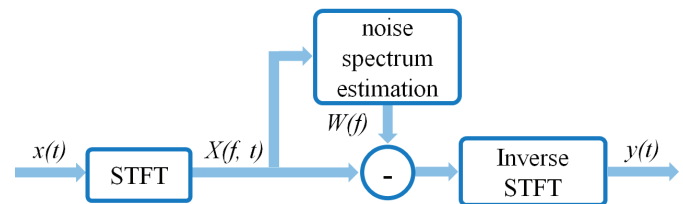


Рис. 2. Схема алгоритма спектрального вычитания шума:

$x(t)$ – исходный сигнал; STFT – оконное преобразование Фурье; $W(f)$ – функция весового окна; $y(t)$ – преобразованный сигнал (составлено авторами)

Fig. 2. The proposed spectral subtraction algorithm scheme:

$x(t)$ – original signal; STFT – Short Time Fourier Transform; $W(f)$ – is the function of the weighting window; $y(t)$ – transformed signal (formulated by the authors)

Разложение сигнала при спектральном вычитании проводилось с использованием специальной весовой функции [22] – окна Блэкмана.

Результаты и их обсуждение

В процессе механической обработки наблюдается изменение свойств ДС, определяющееся различными факторами. Раскрытие особенностей потери устойчивости траектории движения при фрезеровании (рис. 3) позволит определить пути повышения надежности работы технологического оборудования (ТО).

В данном исследовании выходным параметром являлась шероховатость, а для обеспечения требуемой шероховатости поверхности наряду с установлением режимов обработки выполнена оценка динамики пространственных колебаний передней опоры шпинделя (см. рис. 3, б). Вместе с этим амплитудные параметры шероховатости после обработки наклонёнными сферическими инструментами с различным

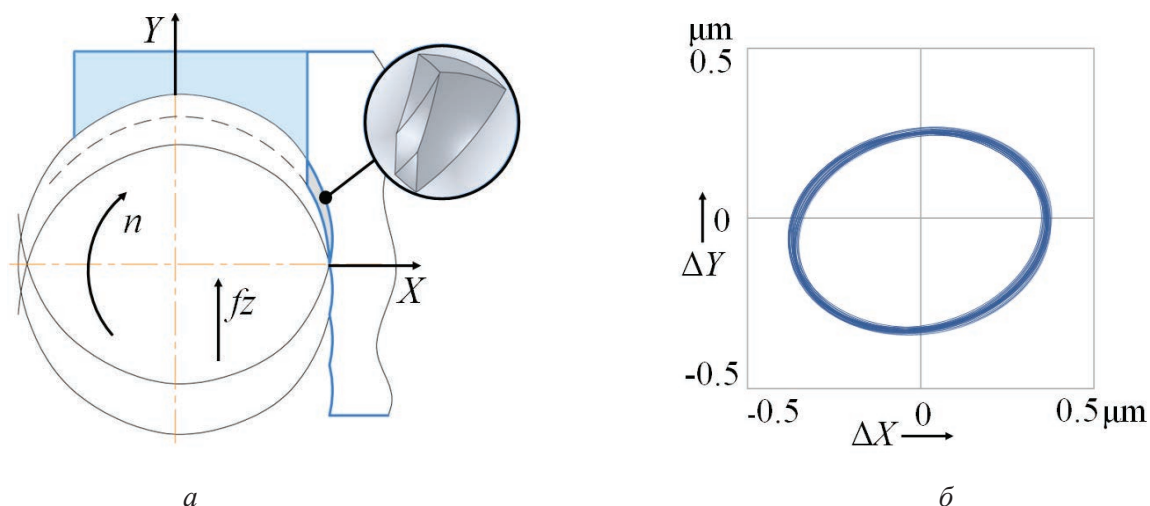


Рис. 3. Схема прохождения режущих кромок фрезы через зону обработки:

- a* – траектория движения i -го зуба соответствующая эффективному диаметру инструмента;
b – траектория отклонения передней опоры шпинделя (составлено авторами)

Fig. 3. Pattern of the passage of the cutting edges of the cutter through the processing zone:

- a* – the trajectory of the i^{th} tooth corresponding to the effective diameter of the tool; *b* – deviation trajectory of the front spindle support (formulated by the authors)

количеством зубьев при попутном фрезеровании представлены в табл. 1. При обработке однозубой фрезой изменение угла наклона практически не влияет на изменение амплитудных параметров шероховатости, т.е. для рассматриваемого случая диапазон запаса устойчивости ДС максимален. Применение двухзубового инструмента приводит к значительным изменениям выходных параметров, представленные расхождения часто вызваны отклонением и износом инструмента, следствием чего является изменение активной зоны резания и повышение уровня вибраций [6] (рис. 4).

Анализ табл. 1, а также рис. 4 позволяет сделать следующие заключения. Во-первых, чем

больше амплитуда виброперемещений, соответствующая частоте резания, тем выше значение амплитудных параметров шероховатости. Во-вторых, амплитуда виброперемещений изменяется при увеличении угла наклона нелинейно, а снижение качества обработанной поверхности происходит ввиду упругих деформаций режущего инструмента, что объясняется распределением составляющих сил резания вдоль режущей кромки [20, 23].

Для практической реализации принципов акустической диагностики требуется, чтобы полученная информация текущего состояния процесса обработки была понятной и достоверной.

Таблица 1

Table 1

Параметры шероховатости после механической обработки сфероцилиндрическим инструментом
Roughness parameters after machining with a ball-end tool

| Количество зубьев фрезы / Number of teeth | Угол наклона, ° / Angle of inclination, ° | Параметры шероховатости, мкм / Roughness parameters, μm | | | | |
|--|--|---|-------|-------|-------|-------|
| | | Ra | Rq | Rz | Rt | Rp |
| 1 | 10 | 0,436 | 0,543 | 2,143 | 4,094 | 1,490 |
| | 25 | 0,498 | 0,531 | 2,532 | 4,810 | 1,355 |
| | 40 | 0,401 | 0,502 | 2,512 | 4,800 | 1,271 |
| 2 | 10 | 0,661 | 0,824 | 3,048 | 4,536 | 2,001 |
| | 25 | 0,620 | 0,793 | 5,104 | 7,599 | 3,079 |
| | 40 | 0,373 | 0,465 | 2,391 | 3,559 | 1,383 |

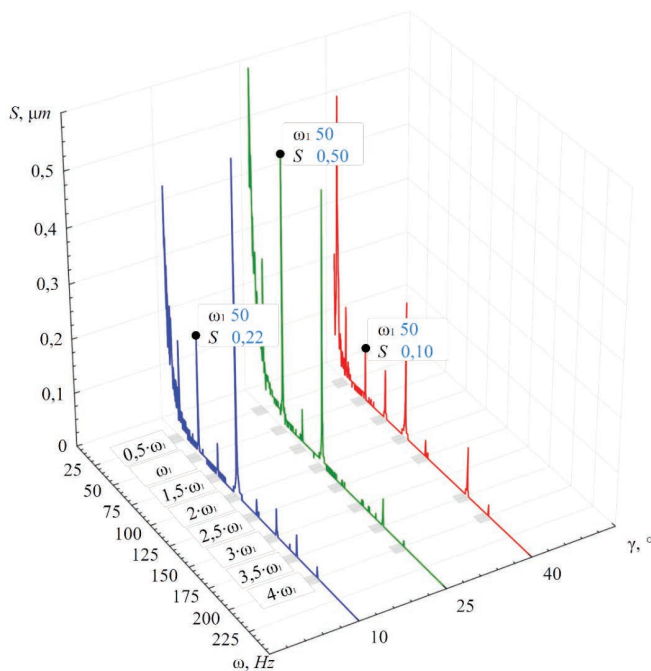


Рис. 4. Амплитуда виброперемещений для различных углов наклона инструмента с двумя зубьями при механической обработке (составлено авторами)

Fig. 4. Comparison of the frequency spectrum after milling with different angles of inclination, $\alpha = 2$ (formulated by the authors)

На рис. 5 представлен акустический сигнал, полученный в ходе проведения эксперимента.

Частотные спектры, представленные на рис. 5, при подробном анализе согласуются с сигналами вибродиагностики, тем не менее целесообразным является анализ акустического сигнала в пределах частотного диапазона резания. Для выделения узкой полосы звуковой волны (рис. 6) применялся FFT-фильтр, который использовал быстрое преобразование Фурье (БПФ), размер БПФ при этом соответствовал значению 4096.

Частота ω_1 соответствует частоте резания (см. рис. 6), а по гармоническому закону резонансные частоты находятся как произведение ω_1 и целого числа ($\omega_1 = 50$ Гц, $2\omega_1 = 100$ Гц и т. д.). Частоты вычисляются до 4-го порядка, так как с повышением порядка интенсивность частоты моды заметно снижается и на более высоких порядках практически не оказывает влияния на общую звуковую картину.

Из записей видно (рис. 7), что акустический сигнал модулируется оборотами инструмента, и при резании двухзубой фрезой амплитуда сигнала

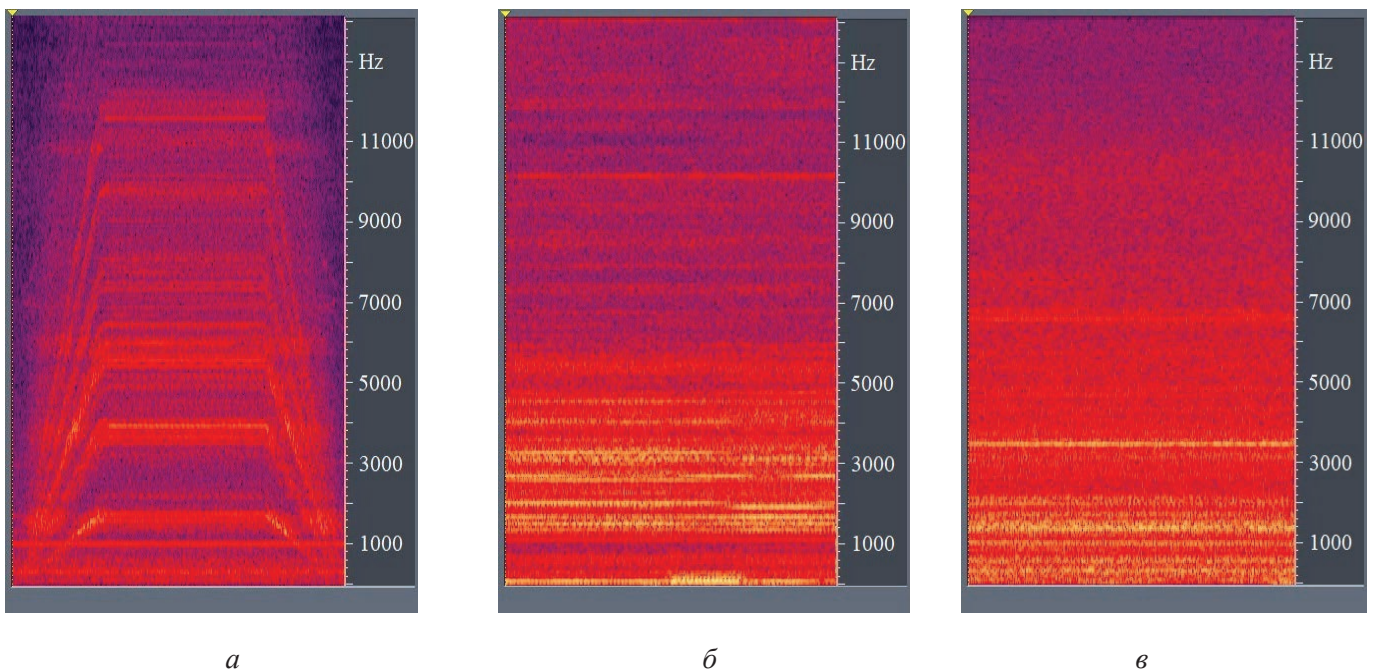


Рис. 5. Частотный спектр звука:

a – разгон шпинделя до $n = 8000 \text{ мин}^{-1}$ и остановка; *б* – обработка при $\alpha = 1$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$; *в* – обработка при $\alpha = 2$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ (составлено авторами)

Fig. 5. Frequency spectrum of the acoustic signal:

a – spindle acceleration to 8000 мин^{-1} and stop; *б* – machining process, $\alpha = 1$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$; *в* – machining process, $\alpha = 2$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ (formulated by the authors)

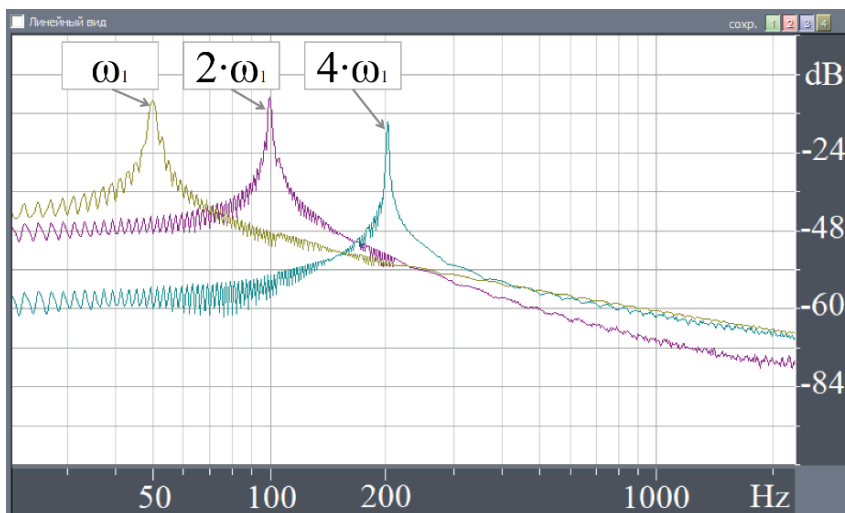


Рис. 6. АЧХ гармонических звуковых волн, полученных при фрезеровании с углом наклона 40 градусов (составлено авторами)

Fig. 6. Frequency response of harmonic sound waves obtained by milling with an inclination angle of 40 degrees (formulated by the authors)

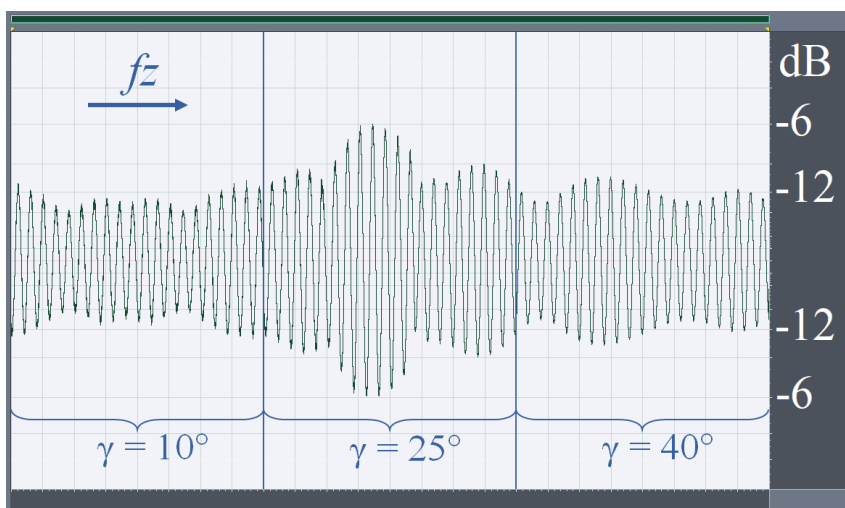


Рис. 7. Фильтрованный акустический сигнал (составлено авторами)

Fig. 7. Filtered acoustic signal (formulated by the authors)

изменяется тогда, когда изменяется угол наклона инструмента.

При исследовании спектра сигналов акустической диагностики установлено равномерное чередование фаз и отсутствие хаотического режима. После удаления шума, фильтрации и нормализации амплитуды сигнала определено ограниченное число точек бифуркации при изменении угла наклона инструмента в процессе механообработки. Указанные факты позволяют заключить, что способ акустического монито-

ринга обладает информативными диагностическими признаками.

Принимая во внимание повышающиеся требования к качеству деталей, стоит сфокусироваться на предсказуемости параметров шероховатости при механической обработке, в этом исследовании – за счет корреляции. Выявленные зависимости на основе величины коэффициента парной корреляции (табл. 2) указывают на возможность влияния на одни получаемые параметры через изменение других и на наличие

Расчетные значения коэффициентов парной корреляции
Calculated values of the pair correlation coefficients

| Сравниваемые величины / Compared values | | Коэффициент корреляции / Correlation coefficient | Существование линейной зависимости / The existence of a linear relationship | Характер линейной зависимости / Linear connection |
|---|--------------|--|---|---|
| $\Phi_1 (Ra)$ | R (Rz) | 0,91 | Весьма вероятно / Highly probable | Возрастающая / Increases |
| $\Phi_2 (Rq)$ | R (Rz) | 0,92 | Весьма вероятно / Highly probable | Возрастающая / Increases |
| $\Phi_3 (Rt)$ | R (Rz) | 0,98 | Весьма вероятно / Highly probable | Возрастающая / Increases |
| $\Phi_4 (Rp)$ | R (Rz) | 0,93 | Весьма вероятно / Highly probable | Возрастающая / Increases |
| $\Phi_5 (\gamma)$ | R (Rz) | -0,41 | Маловероятно / Very improbable | Убывающая / Decreases |
| $\Phi_6 (z)$ | R (Rz) | 0,40 | Маловероятно / Very improbable | Возрастающая / Increases |
| $\Phi_5 (\gamma)$ | $\Phi_6 (z)$ | 0,00 | Не существует / Doesn't exist | - |

предопределяющих микрорельеф поверхности технологических параметров.

Отмеченные в табл. 2 корреляции значимы на уровне $p < 0,05$. Принято считать, что линейная зависимость существует, если модуль коэффициента корреляции соответствует значению от 0,5 до 1. Однако величина коэффициента, заключенная в диапазоне 0,3...0,5, может указывать на существование нелинейной корреляции [24, 25]. График регрессии параметра Rz (рис. 8) свидетельствует о подтверждении вышеуказанного положения.

Для оценки степени влияния угла наклона на амплитудный параметр шероховатости Rz проведен многофакторный регрессионный анализ. Результатом проведенного анализа является математическая модель, характеризующая взаимосвязь между величиной шероховатости, подачи на зуб, диаметром и углом наклона инструмента, выраженная нормализованной моделью, графическая интерпретация которой показана на рис. 9:

$$Rz = 3 + 2,77 f_z - 0,55 \gamma - 1,08 D - 0,51 f_z \gamma - 1 f_z D + 0,22 \gamma D + 0,2 f_z \gamma D.$$

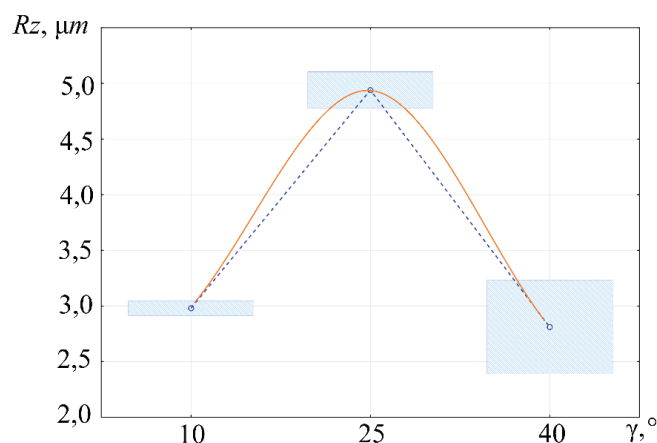


Рис. 8. Параметр Rz в зависимости от угла обработки для двухзубой фрезы (составлено авторами)

Fig. 8. Parameter Rz depending on the machining angle for a double-tooth cutter (formulated by the authors)

При доверительной вероятности $P = 0,95$ расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}}$ меньше, чем табличное $F_{\text{табл}}$, соответственно гипотеза об адекватном представлении модели регрессии (см. формулу) была принята.

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных данных взаимосвязи параметров шероховатости, подачи на зуб и угла наклона, показанных на рис. 9, свидетельствует о незначитель-

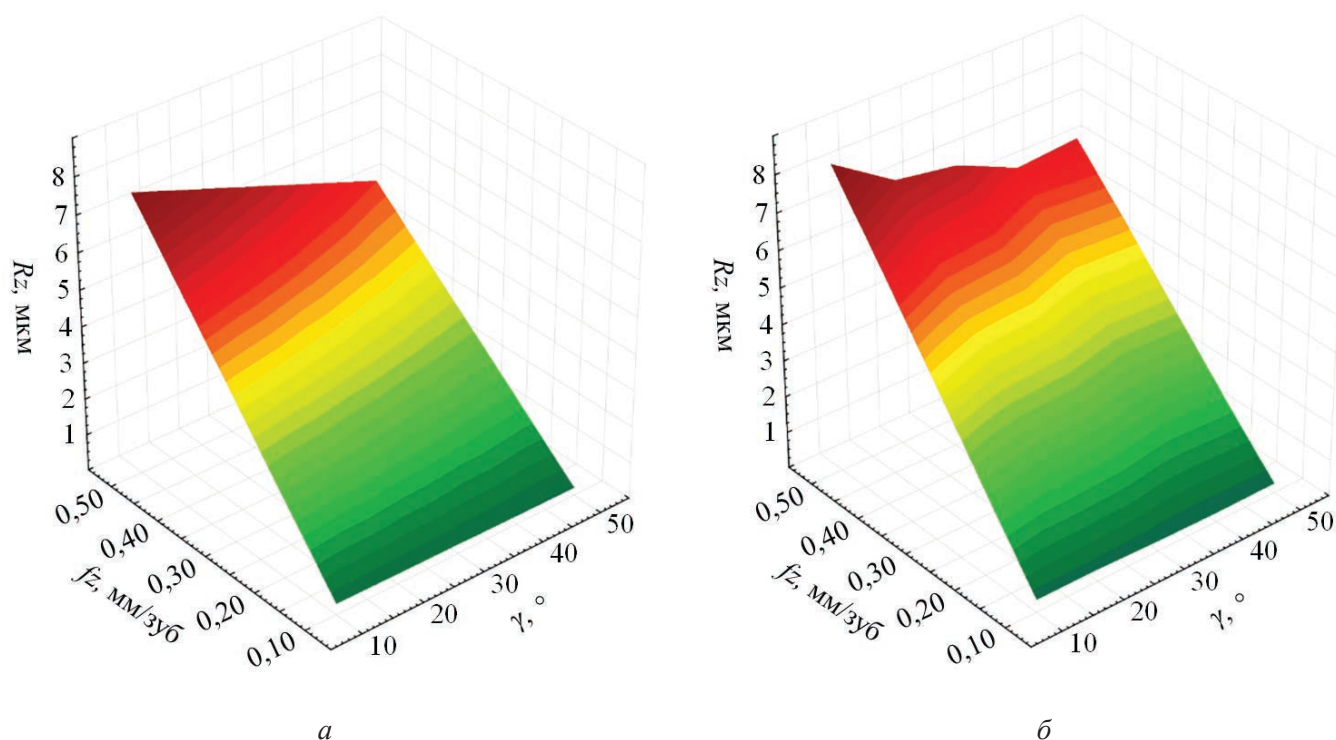


Рис. 9. Зависимости шероховатости Rz от подачи и угла наклона инструмента:

a – теоретическая; b – экспериментальная

Fig. 9. Dependences of the roughness Rz on the feed and the angle of inclination of the tool:

a – theoretical; b – experimental

ных различиях в представлении данных. Вместе с тем форма экспериментальной зависимости отличается от теоретически рассчитанной по уравнению модели регрессии не более чем на 10 %.

Выводы

Экспериментальные данные, полученные при механообработке, позволили определить, что увеличение угла наклона однозубой фрезы практически не влияет на изменение амплитудных параметров шероховатости.

Значения ВА диагностики и шероховатости при использовании двухзубового сфероцилиндрического инструмента показывают согласованную картину с эффектами, создаваемыми углами наклона и опережения. В то же время при частоте резания 50 Гц величина виброперемещения для угла наклона 25° в среднем в 2 раза больше, чем при 10 и 40° .

Амплитудные параметры шероховатости Ra , Rq , Rt , Rp показывают высокую степень корреляции с параметром Rz . В связи с нелинейной взаимосвязью между величиной Rz , подачей fz ,

углом наклона инструмента γ и диаметром инструмента D разработана регрессионная модель, которая позволяет прогнозировать шероховатость обрабатываемой поверхности.

Полученные решения задач мониторинга и анализа параметров шероховатости позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований и уточнить представление о практической реализации акустического способа контроля процесса резания в реальном времени.

Список литературы

1. Influence of vibration amplitude on tool wear during ball end milling of hardened steel / A.V. Anstev, D.T. Ngon, D.H. Trong, E.S. Yanov // 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development. – IEEE, 2018. – P. 232–236. – DOI: 10.1109/GTSD.2018.8595567.
2. Application of measurement systems in tool condition monitoring of Milling: A review of measurement science approach / D.Yu. Pimenov, M.K. Gupta, L.R.R. da Silva, M. Kiran, N. Khanna, G.M. Krolczyk // Measurement. – 2022. – Vol. 199. – P. 111503. – DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111503.

3. Monitoring system for high-tech equipment / V.B. Kuznetsova, D.V. Kondusov, A.I. Serdyuk, A.I. Sergeev // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, N 10. – P. 892–896. – DOI: 10.3103/S1068798X17100136.
4. Tool condition monitoring for high-performance machining systems – A review / A. Mohamed, M. Hassan, R. M'Saoubi, H. Attia // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – P. 2206. – DOI: 10.3390/s22062206.
5. *Mali R.A., Gupta T.V.K., Ramkumar J.* A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 62. – P. 132–167. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.12.014.
6. *Гимадеев М.Р., Лу А.А.* Анализ систем автоматизированного обеспечения параметров шероховатости поверхности на основе динамического мониторинга // *Advanced Engineering Research*. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 116–129. – DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.
7. Effect of the relative position of the face milling tool towards the workpiece on machined surface roughness and milling dynamics / D.Y. Pimenov, A. Hassui, S. Wojciechowski, M. Mia, A. Magri, D.I. Suyama, A. DBustillo, G. Krolczyk, M.K. Gupta // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9 (5). – P. 842. – DOI: 10.3390/app9050842.
8. Effect of cutter path orientations on cutting forces, tool wear, and surface integrity when ball end milling TC17 / L. Tan, C. Yao, J. Ren, D. Zhang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 88. – P. 2589–2602. – DOI: 10.1007/s00170-016-8948-y.
9. Мониторинг состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях / М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров, А.Н. Боган, К.В. Мыслицев // *Вестник УГАТУ*. – 2013. – Т. 17, № 8 (61). – С. 56–62.
10. Investigation of the feasibility of using microphone arrays in monitoring machining / D. Shaffer, I. Ragai, A. Danesh-Yazdi, D. Loker // *Manufacturing Letters*. – 2018. – Vol. 15 (B). – P. 132–134. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.008.
11. *Козлов А.А., Аль-Джонид Х.* Диагностика и прогнозирование износа режущего инструмента в реальном времени // *Современные материалы, техника и технологии*. – 2017. – № 4 (12). – С. 17–21.
12. Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces / Y.P. Chen, J. Gao, H. Deng, D. Zheng // *Precision Engineering*. – 2013. – Vol. 37, N 1. – P. 203–212. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.08.003.
13. Modeling of time-varying surface roughness considering wear overlap per tooth in ball end finish milling / D.J. Cheng, H.J. Quan, S.J. Kim, S.W. Zhang, C.Y. Zhang // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 46. – P. 12309–12330. – DOI: 10.1007/s13369-021-05920-0.
14. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals / C. Cooper, P. Wang, J. Zhang, R.X. Gao, T. Roney, I. Ragai, D. Shaffer // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 49. – P. 105–111. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.004.
15. The surface roughness analysis using sound signal in turning of mild steel / A.U. Patwari, A.A. Zamee, M.H. Bhuiyan, S.M. Sakib // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 703. – P. 012011. – DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012011.
16. *Sahinoglu A., Rafighi M.* Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 45. – P. 765–778. – DOI: 10.1007/s13369-019-04124-x.
17. *Лукьянов А.В., Алейников Д.П.* Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2017. – Т. 56, № 4. – С. 70–82. – DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82.
18. *Алейников Д.П., Лукьянов А.В.* Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – № 2 (97). – С. 28–35.
19. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84–99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.
20. *Gimadeev M.R., Stelmakov V.A., Gusliakov V.V.* Cutting forces and roughness during ball end milling of inclined surfaces // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2021*. – Cham: Springer, 2021. – Vol. 2. – P. 926–937. – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_107.
21. *Кущева М.Е., Клауч Д.Н., Кобелев О.А.* Принципы выбора смазочно-охлаждающих технологических сред для обработки металлов резанием // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2014. – Т. 2, № 1 (19). – С. 73–76.



22. *Левин Е.К., Аль-Дайбани А.М.* Анализ возможностей подавления влияния частотной характеристики канала связи на параметры речевого сигнала // Проектирование и технология электронных средств. – 2018. – № 3. – С. 14–18.

23. *Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х.* Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 3 (708). – С. 11–20. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20.

24. Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / М.Р. Гимадеев, В.М. Давыдов, А.В. Никитенко, А.В. Сарыгин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15, № 6 (174). – С. 243–248.

25. *Гимадеев М.Р., Давыдов В.М.* Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – № 5. – С. 219–224.

Конфликт интересов

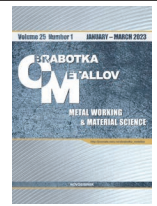
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Experimental study of the dynamics of the machining process by ball-end mills

Mikhail Gimadeev ^{a, *}, Andrey Li ^b, Vera Berkun ^c, Vadim Stelmakov ^d

Pacific National University, 136 Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>, 009063@pnu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9907-4936>, 011864@pnu.edu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5249-2612>, 2015103121@pnu.edu.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>, 009062@pnu.edu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 November 2022

Revised: 14 January 2023

Accepted: 21 January 2023

Available online: 15 March 2023

Keywords:

Ball-end mill

Surface roughness

Vibration

Correlation analysis

Regression analysis

Online monitoring

Tool tilt

Funding

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Khabarovsk Territory within the framework of the regional competition for grants in the form of subsidies from the regional budget for the implementation of projects in the field of fundamental, technical, humanitarian and social sciences. Grant No. 93C/2022 on the topic "Improving the efficiency of process equipment during machining through online monitoring of an acoustic signal".

Acknowledgements

The authors express gratitude to A.V. Nikitenko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technological Informatics and Information Systems (PNU, Khabarovsk), for helping to organize and conduct experimental research at the CAD/CAM technology training and production center. Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Due to a significant number of factors affecting the change in the properties of a dynamic system, excessively conservative processing conditions are chosen to ensure the high quality of the resulting product. This limits the efficiency of the process and leads to an increase in the cost of production. Accordingly, modern approaches are needed that will allow diagnosing the current state of processing and making timely decisions to replace the tool, correct or change the control program. The significance of the ongoing research is to propose a real-time monitoring approach to milling control to identify emerging processing errors, predict potential problems and improve uptime. **Subject.** The paper discusses the features of the real-time monitoring system during mechanical processing with a single- and double-edge cutting tool, taking into account acoustic wave filtering, minimizing surface roughness. **The purpose of the work** is to determine the effect of the inclination orientation of the ball-end tool on the surface roughness value using real-time monitoring during milling on *CNC* process equipment. **Methods.** The study provides methods of correlation and regression analysis. The calculated data were obtained by means of vibroacoustic diagnostics and measured in the range of values of the variable angle of inclination of the surface for single- and double-edge cutting tool based on the provisions of the theory of oscillations and vibroacoustic diagnostics, cutting theory, digital processing and digital filtering of signals. **Results and discussions.** Experimental data obtained during machining made it possible to determine that an increase in the angle of inclination of a single-edge cutting tool has practically no effect on the change in the amplitude parameters of roughness. The values of vibroacoustic diagnostics and roughness, when using a double-edge ball-end tool, show a consistent picture with the effects created by the angles of inclination and advance. The obtained solutions to the problems of monitoring and analyzing the roughness parameters can significantly reduce the amount of experimental research and clarify the idea of the practical implementation of the method of acoustic monitoring of the cutting process.

For citation: Gimadeev M.R., Li A.A., Berkun V.O., Stelmakov V.A. Experimental study of the dynamics of the machining process by ball-end mills. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 44–56. DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56. (In Russian).

* Corresponding author

Gimadeev Mikhail R., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Pacific National University,
136 Tihookeanskaya St.,
Khabarovsk, 680035, Russian Federation
Tel.: 8 (924) 216-31-39, e-mail: 009063@pnu.edu.ru

References

1. Anstev A.V., Ngon D.T., Trong D.H., Yanov E.S. Influence of vibration amplitude on tool wear during ball end milling of hardened steel. *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*. IEEE, 2018, pp. 232–236. DOI: 10.1109/GTSD.2018.8595567.
2. Pimenov D.Yu., Gupta M.K., da Silva L.R.R., Kiran M., Khanna N., Krolczyk G.M. Application of measurement systems in tool condition monitoring of milling: A review of measurement science approach. *Measurement*, 2022, vol. 199, p. 111503. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111503.
3. Kuznetsova V.B., Kondusov D.V., Serdyuk A.I., Sergeev A.I. Monitoring system for high-tech equipment. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 892–896. DOI: 10.3103/S1068798X17100136.
4. Mohamed A., Hassan M., M'Saoubi R., Attia H. Tool condition monitoring for high-performance machining systems – A review. *Sensors*, 2022, vol. 22, p. 2206. DOI: 10.3390/s22062206.
5. Mali R.A., Gupta T.V.K., Ramkumar J. A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 62, pp. 132–167. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.12.014.
6. Gimadeev M.R., Li A.A. Analysis of systems for automated provision of surface roughness parameters based on dynamic monitoring. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22 (2), pp. 116–129. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.
7. Pimenov D.Y., Hassui A., Wojciechowski S., Mia M., Magri A., Suyama D.I., Bustillo A., Krolczyk G., Gupta M.K. Effect of the relative position of the face milling tool towards the workpiece on machined surface roughness and milling dynamics. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (5), p. 842. DOI: 10.3390/app9050842.
8. Tan L., Yao C., Ren J., Zhang D. Effect of cutter path orientations on cutting forces, tool wear, and surface integrity when ball end milling TC17. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 2589–2602. DOI: 10.1007/s00170-016-8948-y.
9. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Bogan A.N., Myslivcev K.V. Monitoring sostoyaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na promyshlennykh predpriyatiyakh [Monitoring of process equipment for industrial enterprises]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University*, 2013, vol. 17, no. 8 (61), pp. 56–62. (In Russian).
10. Shaffer D., Ragai I., Danesh-Yazdi A., Loker D. Investigation of the feasibility of using microphone arrays in monitoring machining. *Manufacturing Letters*, 2018, vol. 15 (B), pp. 132–134. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.008.
11. Kozlov A.A., Al-Jonid Kh. Diagnostika i prognozirovaniye iznosa rezhushchego instrumenta v real'nom vremeni [Diagnosis and prediction of cutting tool wear in real time]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2017, no. 4 (12), pp. 17–21. (In Russian).
12. Chen Y.P., Gao J., Deng H., Zheng D. Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces. *Precision Engineering*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 203–212. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.08.003.
13. Cheng D.J., Quan H.J., Kim S.J., Zhang S.W., Zhang C.Y. Modeling of time-varying surface roughness considering wear overlap per tooth in ball end finish milling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 12309–12330. DOI: 10.1007/s13369-021-05920-0.
14. Cooper C., Wang P., Zhang J., Gao R.X., Roney T., Ragai I., Shaffer D. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 49, pp. 105–111. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.004.
15. Patwari A.U., Zamee A.A., Bhuiyan M.H., Sakib S.M. The surface roughness analysis using sound signal in turning of mild steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 703, p. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012011.
16. Sahinoglu A., Rafighi M. Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 765–778. DOI: 10.1007/s13369-019-04124-x.
17. Lukyanov A.V., Aleynikov D.P. Issledovanie kolebaniy sil vzaimodeystviya frezy s zagotovkoi pri povyshenii skorosti vrashcheniya shpindelya [Analysis of oscillations of cutting forces between a mill and a work-piece when increasing the spindle rotation speed]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 70–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82.
18. Aleinikov D.P., Lukyanov A.V. Issledovanie dinamiki krepleniya datchikov vibratsii shpindel'ei obrabatyvayushchikh tsevtrov [Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 28–35.

19. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Sinergeticheskii podkhod k povysheniyu effektivnosti upravleniya protsessami obrabotki na metallovezhushchikh stankakh [Synergetic approach to improve the efficiency of machining process control on metalcutting machines]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 84–99. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.

20. Gimadeev M.R., Stelmakov V.A., Gusliakov V.V. Cutting forces and roughness during ball end milling of inclined surfaces. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering*. Cham, Springer, 2021, vol. 2, pp. 926–937. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_107.

21. Kushcheva M.E., Klauch D.N., Kobelev O.A. Printsipy vybora smazочно-okhlazhdayushchikh tekhnologicheskikh sred dlya obrabotki metallov rezaniem [Principles of selection of cutting technological mediums for metal cutting]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, vol. 2, no. 1 (19), pp. 73–76. (In Russian).

22. Levin E.K., AlDhaibani A.M. Analiz vozmozhnostei podavleniya vliyaniya chastotnoi kharakteristiki kanala svyazi na parametry rechevogo signala [Suppression opportunities analysis of the communication link frequency response influence on the voice signal parameters]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*, 2018, no. 3, pp. 14–18.

23. Ponomarev B.B., Nguen S.H. Vliyanie orientatsii instrumenta na sily rezaniya pri kontsevom frezerovanii [The influence of tool orientation on cutting forces during end milling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 3 (708), pp. 11–20. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20.

24. Gimadeev M.R., Davydov V.M., Nikitenko A.V., Sarygin A.V. Formirovanie parametrov sherokhovatosti na osnove korrelyatsionnykh svyazei pri chistovom frezerovanii prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostei [Formation of roughness parameters based on correlation relations during finishing milling of spatially complex surfaces]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2019, vol. 15, no. 6 (174), pp. 243–248.

25. Gimadeev M.R., Davydov V.M. Korrelyatsionnye svyazi pokazatelei sherokhovatosti pri frezerovanii sfericheskim instrumentom [Correlation of the roughness parameters in milling of spherical tool]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2019, no. 5, pp. 219–224.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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/>).