

Научная статья

УДК 621.9.025:620.169.1

doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-24-31

Технология и результаты изучения процесса изменения состояния металлорежущего инструмента

Марина Борисовна Бровкова¹, д.т.н.

Анна Викторовна Купцова², к.ф.-м.н.

Павел Владимирович Купцов³, д.ф.-м.н.

Владимир Васильевич Мартынов⁴, д.т.н.

^{1,4} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
(ИМАШ РАН), Москва, Россия

^{2,3} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Россия

¹ bmbasar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1863-0709>

² anna.kuptsova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1991-7620>

³ kupav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2685-9828>

⁴ v-martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

Аннотация. Представлена технология и результаты изучения с её помощью процесса изменения состояния металлорежущего инструмента на примере инструмента, оснащённого пластиной из твёрдого сплава. Показано, что о скорости изменения состояния можно судить по виду двумерной гистограммы, построенной по данным временных рядов сигналов о колебаниях технологической системы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Наличие на гистограмме паттерна типа «хвост кометы» свидетельствует о высокой скорости изменения состояния, в частности, в ходе приработки инструмента. Для отображения механизма изменения состояния используется кросс-корреляционная кривая, вид которой характеризует силу взаимосвязи между направлениями колебаний. Усиление взаимосвязи является признаком стабилизации состояния и выходом инструмента на стационарный режим работы. Идентификация механизма изменения состояния выполняется с помощью процедуры, основанной на статистической проверке гипотезы о значимости изменения коэффициентов преобразования спектров сигналов о колебаниях по направлениям с помощью *t*-критерия Стьюдента. Результаты идентификации показали, что механизм изменения состояния представляет собой изменение связей и связанностей в технологической системе, что приводит к формированию у неё новых динамических свойств, обеспечивающих снижение сил резания за счет перераспределения сил трения между передней и задней поверхностями инструмента и, как следствие, повышающих устойчивость к возмущениям, создаваемым рабочими процессами. Проведено сравнение подхода, использованного при разработке технологии, с подходами, основанными на построении математической (аналитической или стохастической) модели реальной системы. Обосновано направление практической реализации технологии в программном обеспечении систем ЧПУ для более эффективного решения традиционных задачи управления, в частности, технологической, что будет гарантированно обеспечивать повышение надёжности инструмента.

Ключевые слова: режущий инструмент, пластина, состояние, колебания, двумерная диаграмма, кросс-корреляция, коэффициент преобразования спектра, критерий Стьюдента, технология

Благодарности: материал подготовлен в рамках выполнения научного исследования по гранту Российского научного фонда №20-19-00299.

Для цитирования: Бровкова М.Б., Купцова А.В., Купцов П.В., Мартынов В.В. Технология и результаты изучения процесса изменения состояния металлорежущего инструмента // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-24-31

Technology and results of studying the diversification of the operative conditions of metal cutting tools

Marina B. Brovkova¹, D. Eng.

Anna V. Kuptsova², PhD. Eng.

Pavel V. Kuptsov³, Dr. Sci. in Physics and Mathematics

Vladimir V. Martynov⁴, D. Eng.

^{1,4} Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS),
Moscow, Russia

^{2,3} Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

¹ bmsar@mail.ru

² anna.kuptsova@gmail.com

³ kupav@mail.ru

⁴ v-martynov@mail.ru

Abstract. The technology and the results of its investigation contributing to studying the diversification of the operative conditions of metal cutting tools, are presented as exemplified in a tool equipped with a hard alloy plate. It is shown that the rate of diversification can be judged by the appearance of a two-dimensional histogram constructed from time series of signals indicating fluctuations in the technological system in mutually perpendicular planes. The occurrence of a "comet tail" pattern on the histogram indicates a high rate of diversification of operative conditions, in particular, during the running-in of the tool. To show the dynamics of the diversification, a cross-correlation curve is used, the form of which characterizes the strength of the relationship between the directions of oscillation. This networking proves regulation of operative conditions and the transition to a starting operation in a stationary mode. Diversification dynamics is identified using a procedure based on statistical test of the hypothesis for the significance of changes in the transformation coefficients of the spectra of diverse oscillation signals using the Student's *t*-test. The identification results showed that state diversification dynamics is a change in connections and constraint in the industrial process system, which leads to the formation of new dynamic properties that reduce cutting forces due to the redistribution of friction forces between the front and rear surfaces of the tool and, as a result, increase stability for disturbance resulted from the operating procedure. The approach used in the development of the process design is compared with approaches based on the construction of a mathematical (analytical or stochastic) model of a real system. The direction of practical implementation of the technology in the software of CNC systems is justified for more efficient solution of traditional control tasks, in particular, process tasks, which will ensure an increase in the reliability of the tool.

Keywords: cutting tool, plate, condition, vibrations, two-dimensional diagram, cross-correlation, spectrum transformation coefficient, Student's test, technology

Acknowledgements: the material was prepared as part of a scientific study under the grant of the Russian Science Foundation No. 20-19-00299

For citation: Brovkova M.B., Kuptsova A.V., Kuptsov P.V., Martynov V.V. Technology and results of studying the diversification of the operative conditions of metal cutting tools / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-24-31

Одной из основных задач сохранения конкурентоспособности процессов механической обработки материалов является повышение надёжности режущего инструмента, поскольку именно от него, в основном, зависят показатели производительности, простои оборудования и качество обработки несмотря на то, что доля расходов на него в общей себестоимости произведенной продукции составляет всего несколько процентов. Существуют различные подходы к решению этой задачи [1 – 6], в том числе подходы, основанные на изучении сигналов о колебаниях технологической системы, зарегистрированных в процессе её

функционирования, позволяющие не только раскрыть причины, но и определить направления, при реализации которых повышение надёжности инструмента будет гарантированным [7 – 10].

Рассмотрим один из подходов на примере временных рядов сигналов о колебаниях, зафиксированных при проведении эксперимента, в ходе которого осуществлялось точение заготовки из стали 45 диаметром 60 мм на токарном станке 1К625 со скоростью резания 120 м/мин и подачей 0,34 мм/об резцом, оснащённым твёрдосплавной пластиной Mitsubishi UE6020. Каждый

временной ряд соответствовал одному проходу пластины длиной 300 мм. Общее число проходов составило 15. Кроме этого, после каждого цикла точения, состоящего из трёх проходов, с помощью индикаторной головки с ценой деления 0,01 мм измерялось абсолютное значение размерного износа пластины, и рассчитывалась его скорость (рис. 1).

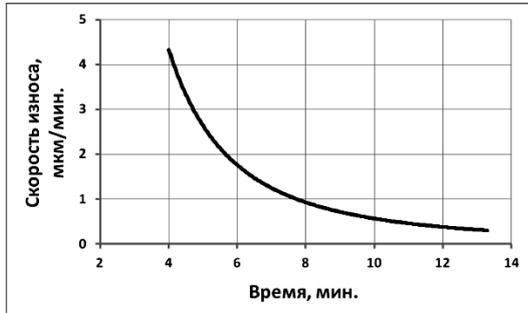


Рис.1. Изменение состояния пластины Mitsubishi UE6020 в ходе эксперимента

Fig.1. Change in the state of the Mitsubishi UE6020 plate during the experiment

Сигналы регистрировались двумя пьезодатчиками, установленными с помощью магнитов на державке пластины по нормали к плоскости резания (координата X) и на резцедержателе в направлении плоскости резания (координата Y). Постоянство скорости резания в

условиях уменьшения диаметра заготовки поддерживалось изменением после каждого цикла точения частоты её вращения в диапазоне 630...1600 мин⁻¹.

Подход к изучению сигналов включал построение двумерных гистограмм (диаграмм, отображающих два ряда данных на одном графике) [11], вычисление коэффициентов кросс-корреляции (взаимной корреляции) [12] и коэффициентов преобразования спектров сигналов (последние представляют собой отношение суммы амплитуд полос спектра, несущих информацию о состоянии технологической системы, включая состояние инструмента, т.е. значимых или информативных, к сумме амплитуд полос, в которых эта информация отражена неявно или слабо, либо совсем отсутствует, т.е. незначимых или шума [13]. Для определения значимых амплитуд использовался непараметрический метод, который в разведочном анализе данных носит название «ящик с усами» [14]).

Фрагменты сигналов пьезодатчиков показаны на рис. 2, *а, б*, а на рис. 2, *в, г* представлены их гистограммы. Видно, что в сигналах присутствуют высоко- и низкочастотные составляющие колебаний. Сигнал от пьезодатчика по координате Y (рис. 1, *г*) имеет плотность распределения, близкую к гауссовой.

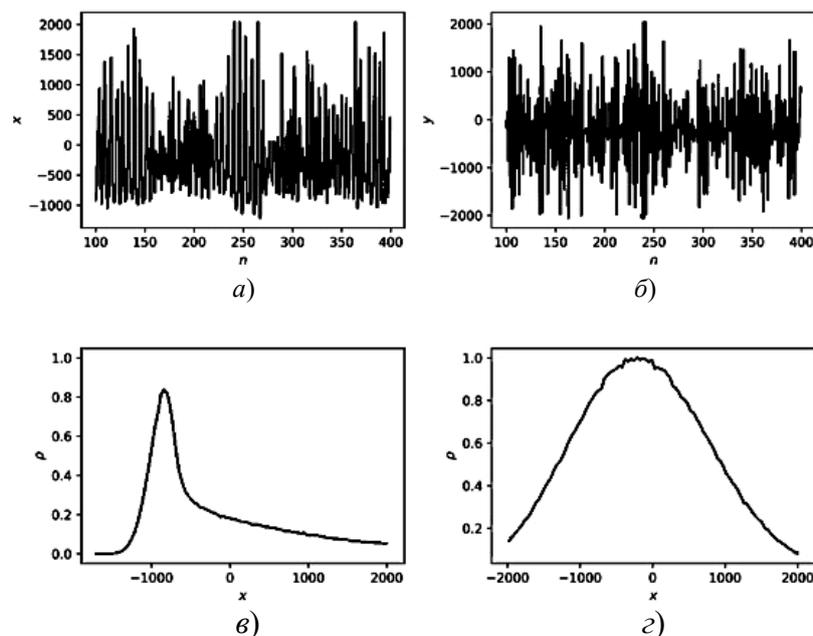


Рис. 2. Вид (*а, б*) и гистограммы (*в, г*) сигналов по координатам X (*а, в*) и Y (*б, г*)

Fig. 2. View (*a, b*) and histograms (*c, d*) of signals at the coordinates X (*a, c*) and Y (*b, d*)

Двумерные гистограммы, построенные по сигналам на 1 проходе (в исходном состоянии пластины), а также на 3, 6, 9, 12 и 15 проходах (т.е. после каждого цикла точения) показаны на

рис. 3. Оттенками серого показаны накопленные значения (выше – светлее). По горизонтали накапливались показания пьезодатчика по координате X , по вертикали – по координате Y .

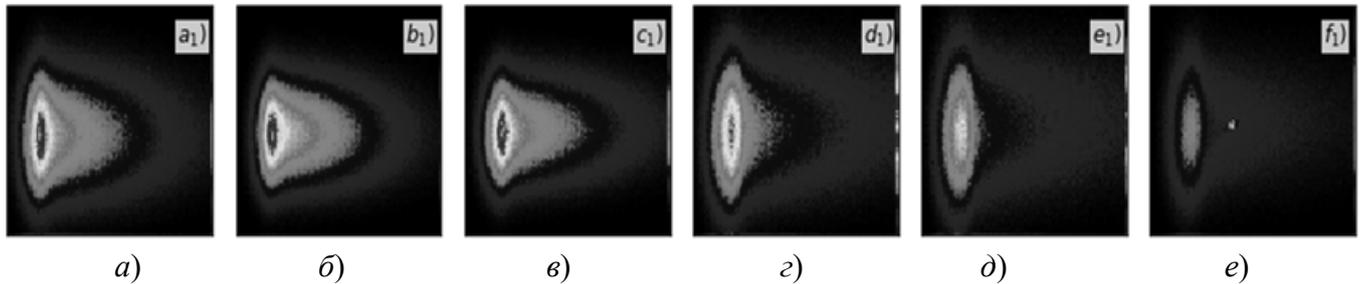


Рис. 3. Двумерные гистограммы сигналов пьезодатчиков на 1 (а), 3 (б), 6 (в), 9 (г), 12 (д) и 15 (е) проходах

Fig. 3. Two-dimensional histograms of piezo sensor signals at 1 (a), 3 (b), 6 (c), 9 (d), 12 (e) and 15 (f) trips

Анализ гистограмм показывает, что исходному состоянию пластины (диаграмма а) отвечает структура, имеющая вид «хвоста кометы», который постепенно уменьшается и на последней диаграмме практически отсутствует. Интерпретировать эти закономерности можно следующим образом: вид диаграмм на рис. 3, а также характер их изменения отражают скорость изменения состояния пластины на каждом проходе (рис. 1). Наличие хвоста кометы говорит о высокой скорости, а его отсутствие означает, что изменение идёт значительно медленнее. В данном случае это можно объяснить тем, что фиксированные частоты вращения заготовки, реализуемые приводом главного движения станка, не обеспечивали поддержания постоянства скорости резания, значение которой, постепенно повышаясь в ходе приработки пластины, приближалось к оптимальному. Основным следствием приработки и оптимизации стал выход пластины на стационарный режим работы.

Изложенное означает, что по виду двумерных гистограмм можно судить о результатах протекания процессов, изменяющих состояние инструмента. Однако они не позволяют идентифицировать механизм, который лежит в основе их получения. С целью идентификации механизма были вычислены коэффициенты кросс-корреляции (взаимной корреляции) $\langle x(t) y(t + \tau) \rangle$ и рассчитаны коэффициенты преобразования спектров сигналов.

Абсолютные значения коэффициентов кросс-корреляции в зависимости от временной задержки τ между сигналами показаны на рис. 4. Анализ коэффициентов показал, что в начале работы (на первом проходе пластины) максимальная корреляция между координатами имеет место со сдвигом $\tau = -4$, где единица времени соответствует периоду дискретизации сигналов. При этом симметричный ему пик для задержки $\tau = 4$ отсутствует. Это означает, что сигнал координаты Y опережает сигнал координаты X и связь односторонняя, т.е. Y выступает как источник воздействия на X . С ростом номера прохода характер связи между координатами усложняется – становятся заметно выше пики в области, которая ограничена задержками $\tau = -22$ и 14 , а сама область делается симметричной относительно исходного пика на $\tau = -4$. Симметрия пиков говорит о появлении и постепенном усилении взаимной связи между координатами. Изложенное означает, что изменение степени взаимосвязи является отображением механизма, изменяющего состояние режущего инструмента.

Для идентификации механизма была реализована следующая процедура. Вначале в пределах каждого прохода пластины выборками по 4096 точек были рассчитаны коэффициенты преобразования спектров сигналов. Затем в полученных массивах коэффициентов были выделены линейные тенденции и произведена оценка значимости их угловых

коэффициентов вычислением отношений коэффициентов к величинам средних квадратических ошибок их определения, представляющих собой t -критерии Стьюдента [15]. На заключительном этапе проводилось сравнение вычисленного значения t с табличным значением t_p для принятого уровня доверительной

вероятности P . Если выполнялось условие $t \geq t_p$, то с вероятностью P это означало, что проход сопровождался значимыми изменениями состояния пластины; в противном случае, т.е. когда $t < t_p$, значимые изменения отсутствовали.

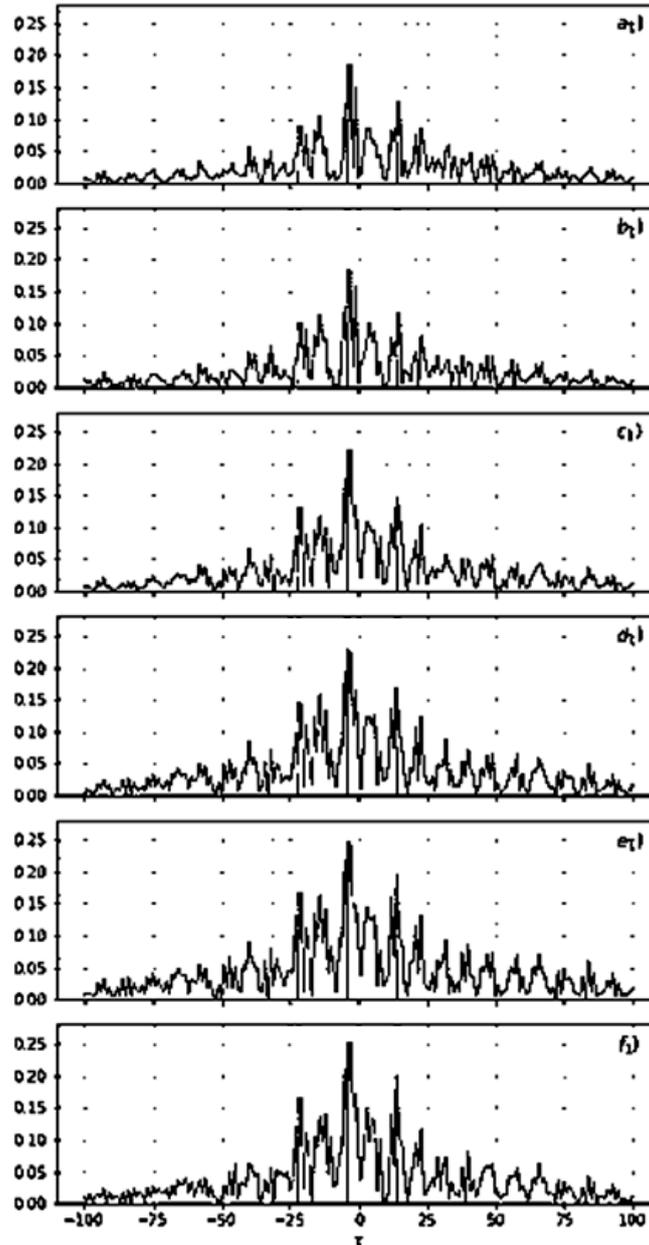


Рис. 4. Взаимная корреляция сигналов X и Y . Максимумы корреляции находятся на временах задержки

Fig. 4. Cross-correlation of signals X and Y . The correlation maxima are at the delay

Тенденции изменения t -критериев по каждой координате за всё время работы пластины показаны на рис. 5, а также табличное

значение t_p для вероятности $P = 0,95$; их сравнение показало следующее.

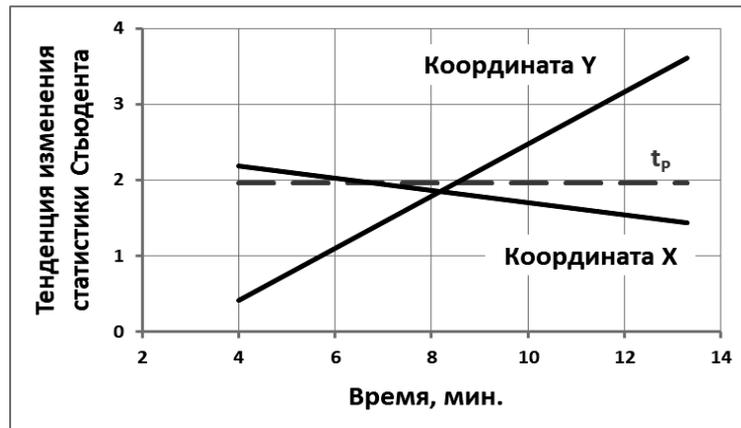


Рис. 5. Статистическое отображение механизма, изменяющего состояние пластины

Fig. 5. Statistical representation of the mechanism that changes the state of the plate

1. Значимые изменения состояния пластины имели место: в направлении координаты X в течение 6,5 мин после начала работы. Сопоставление с рис. 1 показало, что к этому моменту, в основном, завершилась приработка пластины; в направлении координаты Y через 8,5 мин после начала работы. Сопоставление с рис. 1 показало, что с этого момента значение скорости резания стало близко к оптимальному.

2. Смена направления значимых изменений состояния пластины с координаты X на координату Y в результате процессов приработки и оптимизации означает смену доминирования форм и, соответственно, ориентации траектории колебаний пластины на собственных частотах. Основным следствием становится изменение условий взаимодействия пластины с обрабатываемой поверхностью, и взаимодействие приобретает осциллирующий характер, что является благоприятным фактором, поскольку способствует снижению сил резания за счет перераспределения сил трения между передней и задней поверхностями пластины, оказывающего прямое влияние на процесс стружкообразования.

Изложенное означает, что механизм изменения состояния пластины в процессе её работы представляет собой изменение связей и связанностей в технологической системе и, как следствие, формирование у неё новых динамических свойств, обеспечивающих повышение устойчивости к возмущениям,

создаваемым рабочими процессами. Это выгодно отличает предложенный подход к исследованию от подходов, основанных на построении математической (аналитической или стохастической) модели реальной системы за счёт определённым образом формализованного представления её элементов и их взаимодействий, поскольку:

– построение модели ведётся в условиях ряда упрощающих предположений, которые определяют границы её применимости;

– в случае аналитической модели выполнить анализ реальной системы и выделить взаимодействующие элементы таким образом, чтобы получаемая модель обладала требуемой точностью и универсальностью, удаётся далеко не всегда;

– в случае стохастической модели обычно имеет место неизменность статистических характеристик.

Следствием становится снижение вероятности раскрытия с помощью модели установленного в данном исследовании механизма. В связи с этим предложенные процедуры и последовательность их применения могут рассматриваться как перспективная технология оценивания состояния металлорежущего инструмента, реализация которой в программном обеспечении систем ЧПУ позволит более эффективно решать традиционные задачи управления, в частности, технологическую [16, 17], в которой объектом управления становится реализуемый с помощью

технологической системы рабочий процесс (процесс резания), управляемой переменной (в данном случае) – состояние режущего инструмента, а управляющими параметрами – параметры технологического режима (прежде всего скорость резания).

Выводы

1. Разработана технология изучения процесса изменения состояния металлорежущего инструмента, основанная на регистрации сигналов о колебаниях технологической системы резания в направлениях по нормали и вдоль плоскости резания, их отображении в пространство временных, частотных характеристик и статистической проверке гипотез. Практическая реализация технологии позволила установить следующее:

– росту скорости износа соответствует наличие паттерна типа «хвост кометы» на двумерных гистограммах, в ячейках которых накапливаются содержащиеся в сигналах о колебаниях данные;

– стабилизации состояния инструмента соответствует усиление двухстороннего взаимодействия между направлениями колебаний, отображаемое коэффициентами взаимной корреляции (кросс-корреляции);

– механизм стабилизации представляет собой изменение связей и связанностей в динамической системе технологического оборудования (в данном случае за счёт приработки инструмента и оптимизации скорости резания), формирующее в ней новые свойства, которые обеспечивают повышение устойчивости к возмущениям, создаваемым рабочими процессами. Инструментом идентификации механизма является процедура оценки значимости изменения коэффициентов преобразования спектров сигналов о колебаниях в процессе работы инструмента.

2. Технология может быть реализована в программном обеспечении систем ЧПУ технологического оборудования, что позволит более эффективно решать традиционные задачи управления, в частности, технологическую, гарантированно обеспечивая повышение надёжности инструмента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Повышение** качества режущего инструмента / В.Г. Солоненко, Л.А. Солоненко, И.В. Дваденко и др. // СТИН. 2007. №7. С. 12–16.
2. **Зориктуев В.Ц., Никитин Ю.А., Сидоров А.С.** Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента // СТИН. 2007. №10. С. 31–34.
3. **Повышение** стойкости быстрорежущего инструмента ионно-лазерным поверхностным упрочнением / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.В. Новиков и др. // Станки и инструмент. 2005. №6. С. 17–20.
4. **Верещака А.С., Третьяков И.П.** Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М: Машиностроение, 1986. 192 с.
5. **Безъязычный В.Ф., Басков М.В.** Расчетное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. №7. С. 20–24.
6. **Комбинированные** плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте / В.А. Александров, Л.Г. Петрова, А.С. Сергеева и др. // СТИН. 2019. №33. С. 13–19.
7. **Кудинов В.А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
8. **Заковоротный В.Л., Флек М.Б.** Динамика процесса резания. Синергетический подход. Ростов н/Д: Терра, 2006. 876 с.
9. **Жарков И.Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
10. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.** Управление динамическим качеством металлорежущих станков на основе искусственного интеллекта. Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т», 2004. 240 с.
11. **Миркин Б.Г.** Базовые методы анализа данных: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2025. 297 с.
12. **Тюрин Ю.Н., Макаров А.А.** Анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 2002. 528 с.
13. **Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Янкин И.Н., Бровкова М.Б.** Динамический мониторинг технологического оборудования. Саратов: СГТУ, 2008. 312 с.
14. **Большаков А.А., Каримов Р.Н.** Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учебное пособие для вузов. М: Горячая линия-Телеком, 2007. 522 с.
15. **Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М.** Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 2001. 228 с.
16. **Адаптивное** управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. М.: Машиностроение, 1980. 536 с.
17. **Сосонкин В.Л.** Задачи числового программного управления и их архитектурная реализация // Станки и инструмент. 1988. № 10. С. 39–40.

REFERENCES

1. Improving the quality of the cutting tool / V.G. Solonenko, L.A. Solonenko, I.V. Dvadnenko et al. // STIN. 2007. No. 7, pp. 12–16.
2. Zoriktuev V.Ts., Nikitin Yu.A., Sidorov A.S. Monitoring and prediction of cutting-tool wear// STIN. 2007. No.10, pp. 31–34.
3. Improving the durability of a high-speed tool by ion-laser surface hardening / V.N. Latyshev, A.G. Naumov, V.V. Novikov et al. // Machines and tools. 2005. No. 6, pp. 17–20.
4. Vereshchaka A.S., Tretyakov I.P. Cutting tools with wear-resistant coatings. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 192 p.
5. Bezy'azychniy V.F., Baskov M.V. Estimated ranging of cutting tool coating efficiency on the quality parameters of the workpiece surface layer // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017. No. 7, pp. 20–24.
6. Combined plasma methods of chemical and thermal treatment for making modified coatings on tools / V.A. Alexandrov, L.G. Petrova, A.S. Sergeeva et al. // STIN. 2019. No. 33. pp. 13–19.
7. Kudinov V.A. Dynamics of machine tools. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p.
8. Zakorotny V.L., Flek M.B. Dynamics of cutting process. Synergetic approach. Rostov-on-Don: Terra, 2006, 876 p.
9. Zharkov I.G. Vibrations during mechanical edge tooling. Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 184 p.
10. Kabaldin Yu.G., Bilenko S.V., Seriy S.V. Dynamic quality control of metal-cutting machines based on artificial intelligence. Komsomolsk-na-Amurye: Komsomolsk-na-Amurye State Technical University, 2004, 240 p.
11. Mirkin B.G. Core Data Analysis: textbook for universities. Moscow: Yurayt, 2025, 297 p.
12. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Data analysis on a computer. Moscow: INFRA-M, 2002, 528 p.
13. Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Yankin I.N., Brovkova M.B. Dynamic monitoring of technological equipment. Saratov: SSTU, 2008, 312 p.
14. Bolshakov A.A., Karimov R.N. Methods of multi-dimensional data and time series processing: A textbook for universities. Moscow: Gorychaya liniya-Telecom, 2007, 522 p.
15. Afanasyev V.N., Yuzbashev M.M. Time series analysis and forecasting. Moscow: Finance and Statistics, 2001, 228 p.
16. Adaptive control of technological processes / Y.M. Solomentsev, V.G. Mitrofanov, S.P. Protopopov, et al. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 536 p.
17. Sosonkin V.L. Numerical control tasks and their architectural implementation // Machines and tools. 1988. No. 10, pp. 39–40.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.01.2025; одобрена после рецензирования 31.01.2025; принята к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 22.01.2025; approved after reviewing 31.01.2025; assepted for publication 14.02.2025.