

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 621:621.941
EDN: MOQKFJ
DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-184-193



Повышение точности обработки деталей типа «полый цилиндр» на основе превентивной компенсации погрешностей износа инструмента

В.Е. Овсянников¹, Р.Ю. Некрасов², С.С. Чуйков³, Е.М. Кузнецова⁴✉

¹⁻³Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

⁴Курганский государственный университет, Курган, Россия

Резюме. Цель – повышение точности чистового растачивания деталей типа «полый цилиндр» на основе использования превентивных компенсаций износа режущего инструмента. В качестве объекта исследования рассматриваются детали типа «полый цилиндр» на примере втулок цилиндров буровых насосов. Рассматривается операция окончательной обработки центрального отверстия. Обработка производится на токарном станке с числовым программным управлением. В работе предлагается подход, заключающийся в том, что при изготовлении пробной партии изделий осуществляется мониторинг состояния режущей кромки инструмента в динамике. При этом режущее лезвие описывается в виде набора точек, которые в дальнейшем аппроксимируют контур режущей кромки. Учитывая, что характер изнашивания каждой отдельно взятой пластины является случайным, в работе используется подход искусственного интеллекта для решения задачи прогнозирования. Разработана нейро-нечеткая модель, которая описывает режущее лезвие в динамике изнашивания. В модели имеется база знаний, которая пополняется на основе результатов мониторинга формы режущего лезвия. Также модель имеет логический блок, содержащий набор условий, которые позволяют выдавать результаты моделирования с требуемой точностью. Тестирование разработанной модели показывает, что погрешность описания контуров режущего лезвия не превышает 8%. На основе вычисления описаний контура лезвия производится вычисление коррекций траекторий движения режущего инструмента, которые позволяют компенсировать возникающий износ пластины. В результате исследований эффективности полученных решений было установлено, что возможно увеличить эффективность использования инструмента (по критерию стойкости) на 35–45%. Кроме того, созданная нейро-нечеткая модель может быть интегрирована в экспертную систему, которая позволяет снизить риски внезапного отказа режущего инструмента, что особенно важно в случае изготовления деталей гидравлических машин.

Ключевые слова: полый цилиндр, стойкость, растачивание, модель, мониторинг, коррекции

Для цитирования: Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Чуйков С.С., Кузнецова Е.М. Повышение точности обработки деталей типа «полый цилиндр» на основе превентивной компенсации погрешностей износа инструмента // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 184–193. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-184-193>. EDN: MOQKFJ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Improved machining accuracy of hollow cylinder components based on preventive compensation for tool wear errors

Viktor E. Ovsyannikov¹, Roman Yu. Nekrasov²,
Sergey S. Chuikov³, Elena M. Kuznetsova⁴✉

¹⁻³Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

⁴Kurgan State University, Kurgan, Russia

Abstract. Objective – improvement of the precision of finish reaming of hollow cylinder type components by using preventive compensation for cutting tool wear. The study focuses on hollow cylinder type components, exemplified by the liners of drilling pump cylinders, where the finish machining of the central bore is studied. The machining is performed on a numerically controlled lathe. The proposed approach involves dynamic monitoring of the cutting-edge condition during the production of a test batch. The cutting blade is described as a set of points that subsequently approximate the contour of the cutting edge. Since the wear pattern of each individual insert is random, the study uses an artificial intelligence approach to solve the prediction problem. A neuro-fuzzy model was developed to de-

scribe the cutting edge during wear. The model includes a knowledge base that is updated based on the monitoring results of the cutting edge shape. The model also includes a logical block containing a set of conditions that enable the simulation results to be produced with the required accuracy. Testing of the developed model shows that the error in describing the cutting edge contours does not exceed 8%. On the basis of the calculated descriptions of the blade contour, corrections to the cutting tool trajectories are calculated, which allow compensation for the wear of the cutting plate. Research into the effectiveness of the solutions obtained has shown that it is possible to increase tool efficiency (in terms of tool life) by 35–45%. In addition, the developed neuro-fuzzy model can be integrated into an expert system that helps to reduce the risk of sudden cutting tool failure. This is particularly important in the manufacture of hydraulic machine components.

Keywords: hollow cylinder, cutting-tool life, boring, model, monitoring, corrections

For citation: Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Chuikov S.S., Kuznetsova E.M. Improved machining accuracy of hollow cylinder components based on preventive compensation for tool wear errors. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):184-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-184-193>. EDN: MOQKFJ.

ВВЕДЕНИЕ

В гидравлических машинах разного назначения одним из наиболее ответственных элементов, который определяет работоспособность в целом, является пара «поршень-цилиндр» [1, 2]. Не являются исключением в этом отношении и буровые насосы. Отличительной характеристикой цилиндрических узлов для машин данного класса является то, что они имеют довольно большую длину и очень часто изготавливаются сборными [3, 4]. Втулка выполняется в виде сборочной единицы, наружная часть (устанавливаемая в корпусе) является стальной, а внутренняя – чугуновой [5, 6]. Такая комбинация позволяет обеспечить сопротивление воздействию абразивной среды, которая содержится в буровом растворе. Технологической операцией окончательной обработки центрального отверстия втулки является чистовое растачивание. Учитывая малую долговечность и большую потребность в запасных частях, существует необходимость изготовления данных изделий на станках с числовым программным управлением.

СЛОЖНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

Существенной проблемой, которая возникает при изготовлении деталей, является износ режущего инструмента, что, в свою очередь, требует внесения коррекций. Геометрическая интерпретация данного процесса приведена на рис. 1.

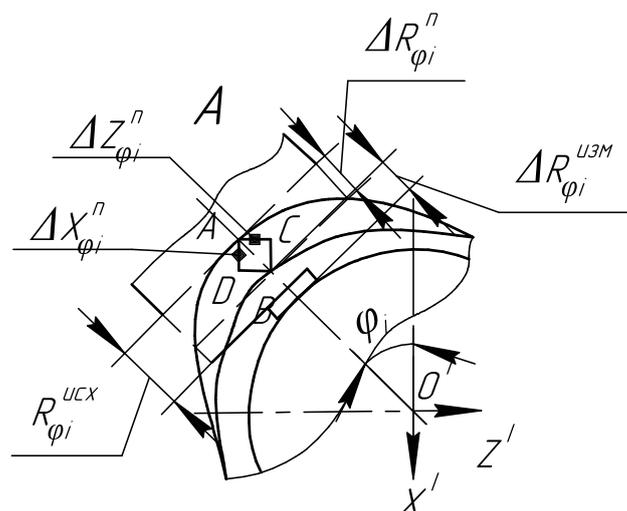


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса изменения формы инструмента [7]

Fig. 1. Geometric interpretation of the tool reshaping process [7]

В случае изготовления детали в условиях использования станков с ручным управлением проблема учета изменения формы режущего лезвия по мере изнашивания решается за счет настройки станка, которая выполняется по результатам выполнения обмеров детали [7–9]. Однако при изготовлении цилиндрических втулок буровых насосов с использованием оборудования с числовым программным управлением имеется необходимость выполнения данного процесса в автоматизированном режиме.

В ряде исследований [10–15] предлагается оценивать состояние режущего инструмента в процессе обработки с использованием косвенных методов. В качестве информационного признака предлагается использовать силы резания, температуру или характеристики вибраций элементов технологической системы. К недостаткам данных подходов можно отнести то, что их внедрение требует внесения изменений в конструкцию технологической системы, установки датчиков и т.д.

Также существует проблема внезапных отказов режущего инструмента [16, 17]. Данная сложность актуальна при изготовлении цилиндрических узлов буровых насосов, т.к. поломка инструмента в процессе обработки приведет к браку всего узла. Ситуация усугубляется тем, что характер изменения формы режущего лезвия и потери его работоспособности случайный. Граница стойкости инструмента нечеткая (рис. 2).

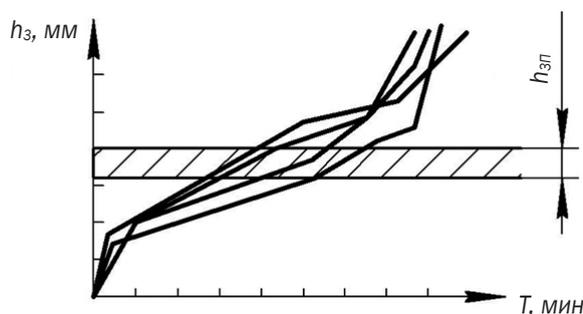


Рис. 2. Нечеткая граница стойкости режущего инструмента (T , мин) в зависимости от фаски износа по задней поверхности (h_z , мм), $h_{зп}$ – предельное значение фаски износа (соответствует зоне катастрофического износа), мм [18]

Fig. 2. Fuzzy limit of the cutting tool life (T , min), depending on the wear chamfer on the rear surface (h_z , mm), $h_{зп}$ is the limit value of the wear chamfer (corresponds to the zone of catastrophic wear), mm [18]

Для того, чтобы корректно учитывать указанный выше характер процесса, целесообразно использовать аппарат нечеткой логики [18–20]. Затем на основе нечеткой логики разработать модель оценки риска выхода инструмента из строя.

Обучение нейронных сетей целесообразно производить на основе данных, полученных в ходе предварительной настройки станка. Это позволит в дальнейшем реализовать превентивную компенсацию погрешностей. Достоинством указанного подхода является то, что отпадает необходимость в использовании дополнительных датчиков и других устройств контроля.

Цель данной работы – повышение точности чистового растачивания деталей типа полого цилиндра на основе использования превентивных компенсаций износа режущего инструмента. В качестве объекта исследования рассматриваются детали типа полого цилиндра на примере втулок цилиндров буровых насосов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований измерение геометрии режущего лезвия осуществлялось с использованием оптического микроскопа (пресеттера). На рис. 3 приведен пример снимка режущей пластины.

По результатам измерений формировались массивы данных, которые содержат данные по смещению точек контура лезвия по осям x и z . При этом имеется возможность вычислить величину смещения точек по формулам [19, 20]:

$$\Delta x_{\varphi_i}^n = \Delta R_{\varphi_i}^n \cdot \text{Cos} \varphi_i; \quad (1)$$

$$\Delta z_{\varphi_i}^n = \Delta R_{\varphi_i}^n \cdot \text{Sin} \varphi_i, \quad (2)$$

где $\Delta R_{\varphi_i}^n$ – начальное положение измеряемой точки контура; φ – угол измеряемого сечения, °.

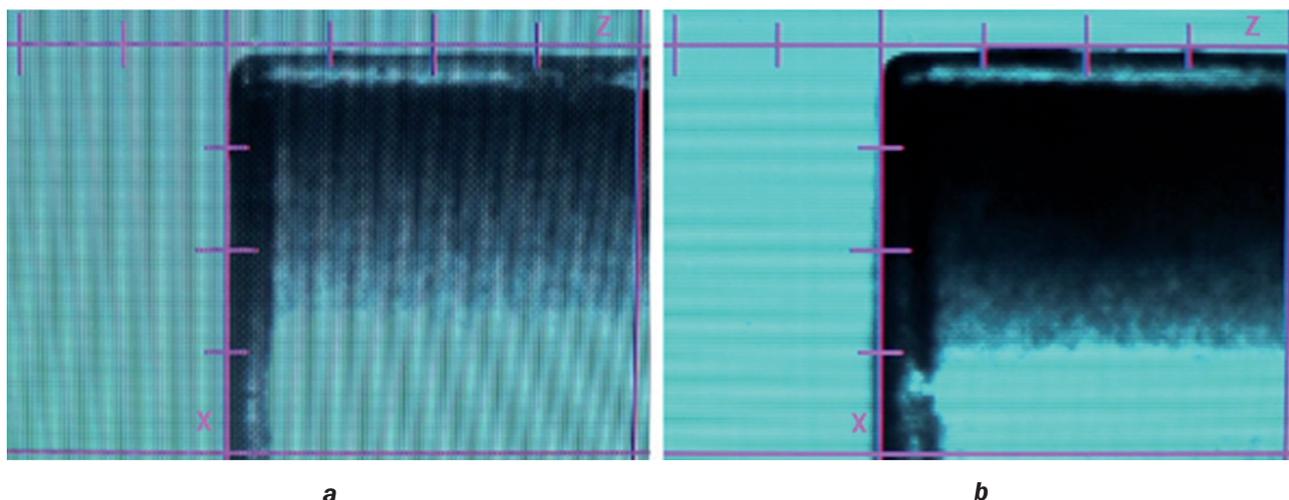


Рис. 3. Пример снимка режущей пластины: а – первое измерение, второй проход, фаска износа по задней поверхности 0,095 мм, $T_0 = 1,85$ мин, $L_{рез} = 222,18$; б – шестое измерение, четырнадцатый проход, фаска износа по задней поверхности 0,161 мм, $T_0 = 10,14$ мин, $L_{рез} = 1217,17$ м

Fig. 3. Example of a cutting insert image: а – first measurement, second pass, wear chamfer on the rear surface is 0.095 mm, $T_0 = 1.85$ min, $L_{рез} = 222.18$; б – sixth measurement, fourteenth pass, wear chamfer on the rear surface is 0.161 mm, $T_0 = 10.14$ min, $L_{рез} = 1217.17$ m

Величина смещения определяется как разница между исходным контуром и контуром, который образуется в результате n -го измерения:

$$\Delta R_{\varphi_i}^n = R_{\varphi_i}^{ucx} - R_{\varphi_i}^n \quad (3)$$

Учитывая тот факт, что характер изменения геометрии лезвия нечеткий, данные, полученные по формулам (1)–(3), загружались в нейро-нечеткую модель.

По результатам измерений и последующей аппроксимации посредством нейро-нечетких моделей имеется возможность вычисления величины коррекции через величину F_{line}^n [21]:

$$\begin{aligned} F_{Line}^n(\varphi, R_{\varphi_i}^n) = & \prod_{i=1}^{p-1} \left[\frac{\varphi - \varphi [i, 2j]}{\varphi [0, 2j] - \varphi [i, 2j]} \right] \times R_{\varphi_i [0, 2j]}^n + \\ & + \sum_{k=1}^{p-2} R_{\varphi_i [k, 2j]}^n \times \prod_{i=0}^{k-1} \left[\frac{\varphi - \varphi [i, 2j]}{\varphi [k, 2j] - \varphi [i, 2j]} \right] \times \prod_{i=k+1}^{p-1} \left[\frac{\varphi - \varphi [i, 2j]}{\varphi [k, 2j] - \varphi [i, 2j]} \right] + \\ & + \prod_{i=0}^{p-2} \left[\frac{\varphi - \varphi [i, 2j]}{\varphi [p-1, 2j] - \varphi [i, 2j]} \right] \times R_{\varphi_i [p-1, 2j]}^n, \end{aligned} \quad (4)$$

где j – номер линии измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пример вектора измерений состояния кромки режущего инструмента приведен ниже:

$$\Delta R_{\varphi_i}^1 = \begin{cases} 0,843; 1,085; 1,264; 1,374; 1,411; 1,376; 1,268; 1,091; 0,851; 0,555; \\ 0,827; 1,064; 1,239; 1,346; 1,383; 1,348; 1,243; 1,069; 0,834; 0,539; \\ 0,017; 0,022; 0,025; 0,028; 0,0278; 0,025; 0,022; 0,017; 0,016... \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 4 представлена структура и результаты тестирования нейро-нечеткой модели определения коррекций на изменение геометрии режущего лезвия при обработке цилиндрических узлов буровых насосов.

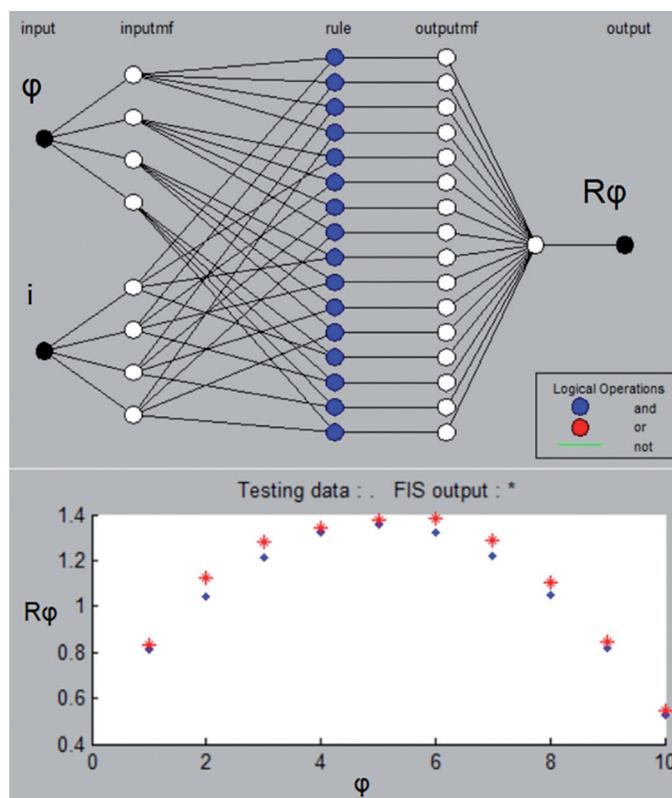


Рис. 4. Структура и результаты тестирования нейро-нечеткой модели определения коррекций
Fig. 4. Structure and results of testing a neuro-fuzzy model for determining corrections

В качестве функций принадлежности были использованы термы трапецеидального вида. Применялся комбинированный метод обучения нейронных сетей. В результате обучения и последующего тестирования модели было установлено, что погрешность полученных результатов не превышает 8%. Таким образом, разработанную модель возможно использовать для решения поставленной задачи.

Результаты, получаемые с использованием модели (см. рис. 4), были подставлены в выражение (4) для вычисления величины коррекций. При этом полученные данные сопоставлялись с результатами испытаний на стойкость. Были установлены диапазоны значений, которые соответствуют приработке, нормальному и катастрофическому износу инструмента. С учетом того, что зависимость стойкости имеет нечеткий характер (см. рис. 2), целесообразно рассматривать риск выхода из строя инструмента. Определение величины риска осуществлялось при помощи функции нечеткой логики.

Входными переменными в нашем случае являются величина коррекции F_n^{line} и значение числа проходов инструмента i . В качестве выходной переменной можно рассматривать риск поломки пластины Rpl . Уровень риска определяется следующими градациями:

- «низкий уровень» – когда инструмент вошел в зону нормального износа;
 - «приемлемый уровень» – инструмент находится в зоне нормального износа;
 - «высокий уровень» – инструмент подходит к зоне катастрофического изнашивания;
 - «критический риск» – вероятность отказа инструмента выходит за допустимые границы.
- Внешний вид функции нечеткой логики для указанного случая приведен на рис. 5.

Для подтверждения состоятельности полученных результатов было проведено тестирование разработанной системы. Обрабатывались образцы с диаметром отверстия 50 мм и длиной 100 мм. Коррекции вносились в виде смещения контура режущей кромки

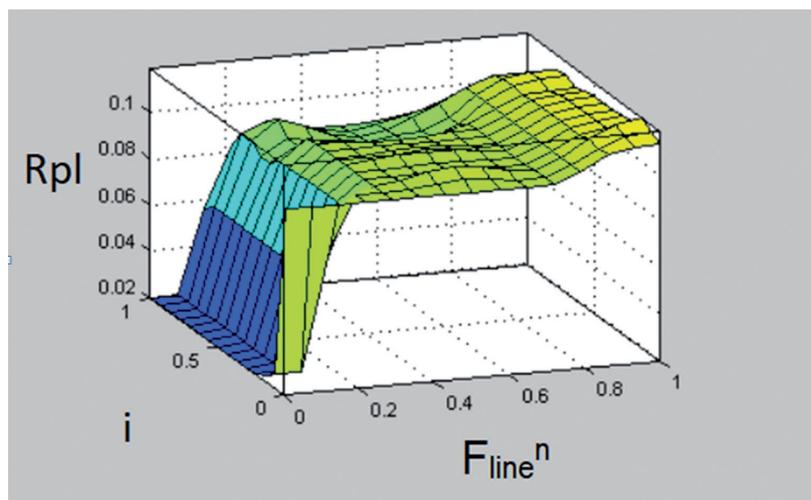


Рис. 5. Функция нечеткой логики для оценки риска отказа инструмента
 Fig. 5. Fuzzy logic function for tool failure risk assessment

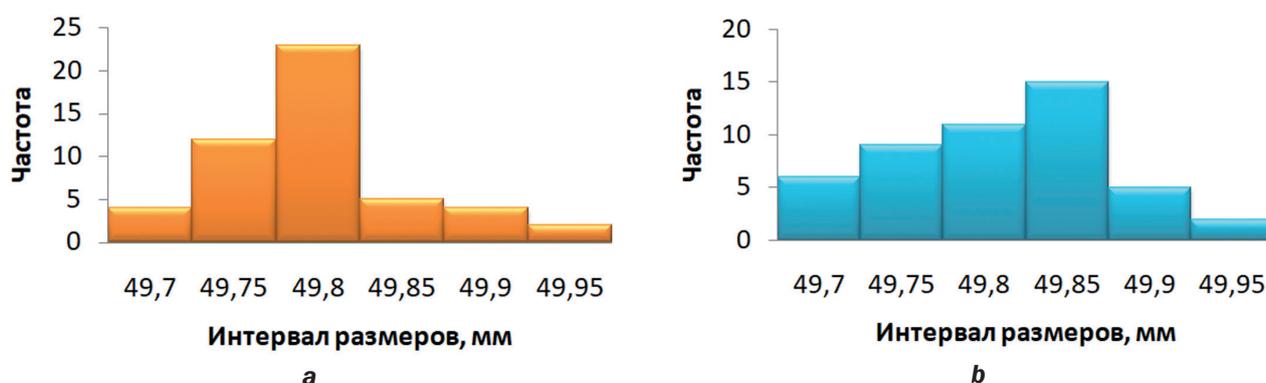


Рис. 6. Результаты опытной обработки деталей: а – с внесением коррекций; б – без внесения коррекций
 Fig. 6. Results of part experimental machining: a – with corrections; b – without corrections

с использованием массивов вида (5) на основе вычислений по модели, представленной на рис. 4.

Было выполнено две серии опытов для сравнения полученных результатов. В первом случае обработка производилась с использованием коррекций на положение режущей кромки инструмента в зависимости от износа (превентивной компенсации) погрешностей. Во втором случае коррекция не производилась.

На рис. 6 приведены гистограммы распределения размеров деталей в результате обработки с использованием системы внесения коррекций (рис. 6 а) и без внесения коррекций (рис. 6 б).

Выше была произведена предварительная обработка результатов исследований в области повышения точности при обработке на токарном станке с ЧПУ, что позволяет перейти к формулированию заключительных положений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная модель вычисления коррекции на изменение формы режущего лезвия при растачивании цилиндрических втулок буровых насосов позволяет вносить изменения в траекторию движения режущего инструмента. Это дает возможность превентивно устранять возникающие погрешности и увеличить эффективность эксплуатации инструмента, производительность и качество обработанной поверхности.

В результате тестирования нейро-нечеткой модели было установлено, что погрешность не превышает 8%. На основе обработки результатов опытных испытаний (см. рис. 6)

и измерений кромки режущего инструмента с использованием оптического микроскопа (см. рис. 3) было установлено, что в результате использования превентивной коррекции возможно увеличить среднюю точность обработки на 1–2 качества (с 11 до 9), производительность – до 20% (по общему количеству удаленного материала режущей кромкой до катастрофического износа) и эффективность эксплуатации инструмента – до 25% (для пластины с четырьмя гранями).

Список источников

1. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В., Исмаилов М.А., Харченко Е.В. Повышение ударно-абразивной износостойкости деталей клапана бурового насоса // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4. № 1. С. 39–44. <https://doi.org/10.21822/2713-220X-2023-4-1-39-44>. EDN: LCBCWX.
2. Иванов Е.А., Иванова О.В., Грицына Н.И. Изготовление биметаллических подшипников скольжения для буровых насосов в условиях ТОО «Венчурная фирма «Поиск» // Вестник Северо-Казахстанского университета им. Манаша Козыбаева. 2022. № 3. С. 149–158. <https://doi.org/10.54596/2309-6977-2022-3-149-158>. EDN: YLGEIK.
3. Пат. № 24529, Российская Федерация, U1, F16J, 1/00. Поршень бурового насоса / патентообладатели: С.Б. Юрочкин, А.И. Павлов, Л.В. Кисельникова. № 2001133902/20. Заявл. 13.12.2001; опубл. 10.08.2002. EDN: CQANWN.
4. Пат. № 117553, Российская Федерация, U1, 15/06, F16K, 1/36. Клапан бурового насоса / Д.О. Макушкин, А.Ф. Мурашко, А.В. Давыдов; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. № 2010145971/06. Заявл. 10.11.2010; опубл. 27.06.2012. EDN: MOGFQR.
5. Пат. № 2770342, Российская Федерация, C1, F04B, 47/00. Насос буровой трехпоршневой одностороннего действия / Р.Ф. Файрушин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Иж-дрин Холдинг». № 2021119163. Заявл. 29.06.2021; опубл. 15.04.2022. EDN: EELKXO.
6. Пат. № 30383, Российская Федерация, U1, E21B, 21/06, 21/10. Насос для буровой установки / заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Уральский машиностроительный завод». № 2003104460/20. Заявл. 19.02.2003; опубл. 27.06.2003. EDN: NIXYSO.
7. Смирнова Е.Н., Крылов Е.Г. Проблема автоматизированного проектирования технологических процессов с учетом технологической наследственности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 13. С. 100–102. EDN: ONCNMF.
8. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2019. Vol. 31. No. 3. P. 85–98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
9. Пухов А.С. Организационно-технические и экологические принципы создания автоматизированных систем // Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения – 2017: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (с. Лесниково, 25–26 мая 2017 г.). Лесниково: Курганская гос. сельскохозяйств. акад. им. Т.С. Мальцева, 2017. С. 336–342. EDN: YQXKXK.
10. Карлина Ю.И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1. С. 17–23. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23) EDN: WQHCPRV.
11. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures // Materials Research Proceedings (Temryuk, 6–10 September 2021). Temryuk, 2022. P. 323–328. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-57>. EDN: ZBJDOB.
12. Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
13. Кабалдин Ю.Г., Иванов С.В., Башков А.А. Управление устойчивостью трибосистемами при внешнем трении и резании на основе алгоритмов нелинейной динамики, теории фракталов и нейросетевого моделирования // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. № 13. С. 150–156. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. EDN: NXFIAU.
14. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 112. P. 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
15. Безъязычный В.Ф., Паламарь И.Н. Современные аспекты автоматизации научных исследований качества поверхности деталей машин с использованием методов машинного обучения // Научные исследования в машиностроении. 2021. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
16. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910. P. 220–225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.

17. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect // Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference (Rostov-on-Don, 9–11 September 2023). Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc., 2023. Vol. 2507. Iss. 1. P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
18. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // Revista Facultad de Ingenieria. 2022. No. 103. P. 88–95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
19. Stupnytskyy V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.23939/ujmeme2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 3. P. 220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.
21. Темпель Ю.А., Некрасов Р.Ю., Темпель О.А. Моделирование влияния сил резания на геометрию детали и алгоритм автоматизации коррекции управляющей программы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 533–537. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-533-538>. EDN: JKPXBZ.

References

1. Gasanov B.G., Sirotin P.V., Ismailov M.A., Harchenko E.V. Improving the shock-abrasive wear resistance of mud pump valve parts. *Scientific Research: Results and Prospects*. 2023;4(1):39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.21822/2713-220X-2023-4-1-39-44>. EDN: LCBCWX.
2. Иванов Е.А., Иванова О.В., Грицына Н.И. Production of bimetallic sliding bearings for drilling pumps in conditions venture firm Poisk LLP. *Vestnik of M. Kozybayev North Kazakhstan University*. 2022;3:149-158. (In Russ.). <https://doi.org/10.54596/2309-6977-2022-3-149-158>. EDN: YLGEIK.
3. Yurochkin S.B., Pavlov A.I., Kisel'nikova L.V. *Drilling pump piston*. Patent RF, no. 24529; 2002. (In Russ.). EDN: CQANWN.
4. Makushkin D.O., Murashko A.F., Davydov A.V. *Mud pump valve*. Patent RF, no. 117553; 2012. (In Russ.). EDN: MOGFQR.
5. Fairushin R.F. *Single-acting three-piston drilling pump*. Patent RF, no. 2770342; 2022. (In Russ.). EDN: EELKXO.
6. Urals Machine-Building Plant. *Pump for a drilling rig*. Patent RF, no. 30383; 2003. (In Russ.). EDN: NIXYSO.
7. Smirnova E.N., Krylov E.G. Issues of technological process computer-aided design based on technological heredity. *Bulletin of the Technological University*. 2011;13:100-102. (In Russ.). EDN: ONCNMF.
8. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2019;31(3):85-98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
9. Pukhov A.S. Organizational, technical and environmental principles for automated system creation. In: *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: problemy i resheniya – 2017: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Life Safety: Problems and Solutions - 2017: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 25–26 May 2017, Lesnikovo. Lesnikovo: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev; 2017, 336-342. (In Russ.). EDN: YQQXKK.
10. Karlina Yu.I. Integration of stages of preparation of production of high-precision small parts on CNC machines. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;1:17-23. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23). EDN: WQHCPV.
11. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures. In: *Materials Research Proceedings*. 6–10 September 2021, Temryuk. Temryuk; 2022, p. 323-328. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-57>. EDN: ZBJDOB.
12. Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Shchetinin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials & Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
13. Kabaldin Yu.G., Ivanov S.V., Bashkov A.A. Tribosystem stability control under external friction and cutting based on the algorithms of nonlinear dynamics, fractal theory and neural network modeling. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2024;13:150-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. EDN: NXFAIU.
14. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;112:202-213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
15. Bezyazychnyy V.F., Palamar' I.N. Current aspects in automation of scientific researches of machinery surface quality using machine learning methods. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2021;7:12-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.

16. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools. *Key Engineering Materials*. 2022;910:220-225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.
17. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect. In: *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference*. 9–11 September 2023, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc.; 2023, vol. 2507, Iss. 1, P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
18. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines. *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022;103:88-95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
19. Stupnytskyy V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022;8(1):1-11. (In Russ). <https://doi.org/10.23939/ujmeme2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220-222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XXMQTZ.
21. Tempel Yu.A., Nekrasov R.Yu., Tempel O.A. Simulation of the influence of cutting forces on the part geometry and algorithm for automation of correction of the control program. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technical Sciences*. 2022;4:533-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-533-538>. EDN: JKPXBZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Овсянников Виктор Евгеньевич,**

д.т.н., доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
vik9800@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8775-0781>

Некрасов Роман Юрьевич,

к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
nekrasovryu@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>

Чуйков Сергей Сергеевич,

к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой металлорежущих станков,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
chuikovss@tyuiu.ru
orcid.org/0000-0002-1823-8255

Кузнецова Елена Михайловна,

к.т.н.,
старший преподаватель кафедры автоматизации
производственных процессов,
Курганский государственный университет,
640669, г. Курган, ул. Советская, 63/4, Россия
✉ lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Viktor E. Ovsyannikov,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
vik9800@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8775-0781>

Roman Yu. Nekrasov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
nekrasovryu@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>

Sergey S. Chuikov

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Metal-Cutting
Machines, Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
chuikovss@tyuiu.ru
orcid.org/0000-0002-1823-8255

Elena M. Kuznetsova,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer of the Department of
Industrial Process Automation,
Kurgan State University,
63/4 Sovetskaya St., Kurgan 640669, Russia
✉ lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2025 г.; принята к публикации 10.06.2025 г.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 10.06.2025.