

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9.048

doi: 10.30987/2782-5957-2025-4-4-11

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Александр Андреевич Владимиров^{1✉}, Юрий Александрович Цыганков²

^{1,2} Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Старый Оскол, Россия

¹ vladimirov.al.an@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

² TsY-18@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3001-8362>

Аннотация

Цель исследования заключается в возможности применения интеллектуальных систем совместно с технологией вибрационного точения с целью обеспечения качества поверхностного слоя и повышения эксплуатационных свойств изделий в таких отраслях как автомобилестроение, авиастроение, космическая техника, горно-металлургическая техника и т.д.

Задача, решению которой посвящена статья, заключается в обеспечении эксплуатационных свойств деталей машин методом вибрационного точения. В большей степени эксплуатационные свойства зависят от параметров качества поверхностного слоя, которые определяют износостойкость, усталостную прочность и другие эксплуатационные свойства деталей машин.

Методы исследования. Теоретический анализ литературных источников по формированию на контактирующих поверхностях деталей машин регулярного микрорельефа, позволяющего повысить эксплуатационные свойства деталей машин и оборудования.

Новизна работы заключается в том, что будут получены нейросетевые модели, позволяющие по заданной форме регулярного микрорельефа, степени, глубине поверхностного слоя определять режимы обработки поверхности. Практическая значимость состоит в разработке технологии, кото-

рая позволит получать на поверхности деталей требуемый регулярный микрорельеф, степень, глубину, обеспечивающие им необходимые эксплуатационные характеристики.

Результаты исследования. В результате проведенного теоретического анализа были представлены перспективы применения вибрационного точения совместно с интеллектуальными системами для обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин при формировании регулярного микрорельефа.

Выводы: одним из основных направлений развития современного машиностроения является создание автоматизированных систем управления жизненным циклом изделия на основе искусственного интеллекта. Особое внимание уделяется перспективам применения вибрационного резания для формирования регулярного микрорельефа. Обосновывается предположение о целесообразности создания интеллектуальной системы обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин на основе искусственных нейронных сетей, позволяющей обеспечивать на поверхности детали регулярный микрорельеф заданной формы при требуемой степени, глубине.

Ключевые слова: микрорельеф, шероховатость, поверхность, характеристики, колебания, точение, обучение, нейронные сети.

Ссылка для цитирования:

Владимиров А.А. Перспективы применения интеллектуальных систем для обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин / А.А. Владимиров, Ю.А. Цыганков // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 4. – С. 4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2025-4-4-11.

Original article

Open Access Article

PROSPECTS FOR THE USE OF INTELLIGENCE SYSTEMS TO ENSURE THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER OF MACHINE PARTS

Aleksander Andreevich Vladimirov^{1✉}, Yury Aleksandrovich Tsygankov²

^{1,2} Starooskolsky Technological Institute (branch) of MISIS, Stary Oskol, Russia

¹ vladimirov.al.an@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

² TsY-18@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3001-8362>

Abstract

The study objective is to find the possibility of using intelligence systems together with vibration turning technology to ensure the quality of the surface layer and improve the performance properties of products in industries such as automotive, aircraft, space technology, mining and metallurgical engineering, etc.

The task to which the paper is devoted is to ensure the operational properties of machine parts by vibration turning. To a greater extent, the operational properties depend on the quality parameters of the surface layer, which determine the wear resistance, fatigue strength and other operational properties of machine parts.

Research methods. Theoretical analysis of literature references on the formation of regular microrelief on the contacting surfaces of machine parts, which makes it possible to improve the operational properties of machine parts and equipment.

The novelty of the work is in the fact that neural network models will be obtained that allow determining surface treatment modes based on a given shape of a regular microrelief, degree, and depth of the surface layer. The practical significance is in the development of a technology that will allow obtaining the required

regular microrelief, degree, and depth on the surface of the parts, providing them with the necessary operational characteristics.

Study results. As a result of the theoretical analysis, the prospects of using vibration turning together with intelligence systems to ensure the quality of the surface layer of machine parts during the formation of a regular microrelief are presented.

Conclusions: one of the main directions of developing modern mechanical engineering is creating automated product lifecycle management systems based on artificial intelligence. Special attention is paid to the prospects of using vibration cutting to form a regular microrelief. The assumption is substantiated about the expediency of creating an intelligence quality assurance system for the surface layer of machine parts based on artificial neural networks, which makes it possible to provide a regular microrelief of a given shape on the surface of the part at the required degree and depth.

Keywords: microrelief, roughness, surface, characteristics, vibrations, turning, learning, neural networks.

Reference for citing:

Vladimirov AA, Tsygankov YuA. Prospects for the use of intelligence systems to ensure the quality of the surface layer of machine parts. *Transport Engineering*. 2025;4:4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2025-4-4-11.

Введение

В текущей политико-экономической ситуации крайне остро стоит проблема импортозамещения и производства не уступающих по своему техническому уровню лучшим зарубежным образцам отечественных машин и механизмов. В связи с этим задача увеличения эксплуатационных свойств деталей машин является весьма актуальной для обеспечения конкурентоспособности изделий отечественного машиностроения. Особенно важным является повышение эксплуатационных

свойств изделий в таких высокотехнологичных отраслях, как автомобилестроение, авиастроение, космическая техника, горно-металлургическая техника и т.д.

Эксплуатационные свойства деталей машин (износостойкость, усталостная прочность и т.д.) в значительной степени определяются параметрами качества их поверхностного слоя. К данным параметрам относятся шероховатость поверхности, микротвердость и величина остаточных напряжений.

Анализ литературных источников и постановка проблемы

Именно параметры качества поверхностного слоя (шероховатость поверхности, микротвердость и т.д.) в значительной степени определяют износостойкость,

усталостную прочность и другие эксплуатационные свойства деталей машин. Задача их повышения является комплексной, поскольку требует проведения масштаб-

ных исследований как геометрии, так и механических характеристик поверхностного слоя. Сложный характер зависимости свойств поверхностного слоя от режимов обработки поверхности делает невозможным применение для их выявления традиционных аналитических методов. Для решения этой задачи предлагается использование искусственных нейронных сетей.

Из анализа работ [1-3] известно, что формирование на контактирующих поверхностях деталей машин регулярного микрорельефа позволяет значительно повысить их эксплуатационные свойства. Классическим примером подобной технологии является хонингование цилиндров двигателей внутреннего сгорания, позволяющее за счет образования микронеровностей определенного направления и формы значительно улучшить условия трения между поршнем и цилиндром и повысить ресурс двигателя. Однако, широкое применение регулярных микрорельефов поверхности в машиностроении сдерживается их недостаточной изученностью. В частности, значительные трудности представляет выбор технологии получения требуемой формы микрорельефа. Микронеровности на поверхности имеют сложную трехмерную структуру, и рассчитать режимы обработки, позволяющие при заданной форме инструмента и заготовки получать требуемый микрорельеф, аналитическими методами в большинстве случаев не представляется возможным. Эмпирические методы подбора режимов обработки поверхностей весьма сложны и трудоемки.

Одним из основных направлений развития современного машиностроения

Результаты и обсуждение

В качестве изначального направления исследований для апробирования гипотезы было выбрано вибрационное точение сталей аустенитного класса, где авторами ранее были получены различные формы микрогеометрии обработанных поверхностей [21-22]. На обработанных поверхностях после вибрационного точения наблюдались следы колебаний режущего инструмента, которые представляли собой радиусные впадины, высота которых соот-

вляется создание автоматизированных систем управления жизненным циклом изделия на основе искусственного интеллекта [4-6]. Применение данных систем позволит снизить себестоимость изготовления машин и механизмов при одновременном повышении их эксплуатационных характеристик за счет выбора рациональной структуры технологического процесса изготовления деталей и режимов обработки.

В последнее время для решения задач, связанных с анализом сложной нелинейной геометрии, широкое применение нашли методы искусственного интеллекта, в частности глубокие нейронные сети [7-9]. Ряд исследователей рассматривали применение нейронных сетей для прогнозирования шероховатости поверхности при обычном точении [10-13]. Однако, такие исследования имеют лишь теоретическое значение, поскольку шероховатость при обычном точении также может быть предсказана с помощью традиционных методов.

Существует ряд работ, посвященных измерению [14-17] и прогнозированию [18-20] с их помощью высотных параметров шероховатости поверхности (Ra , Rz и т.д.) при различных видах обработки. Данные работы имеют существенное теоретическое значение с точки зрения разработки методологии научных исследований, однако практическая значимость их невелика, поскольку высотные параметры шероховатости вполне могут быть рассчитаны и с помощью классических аналитических методов.

ветствует амплитуде колебаний, а их количество и расположение соответствует соотношению частоты вращения заготовки и частоты колебаний режущего инструмента (рис. 1).

Особенность применения метода вибрационного точения позволяет сочетать на обрабатываемой поверхности механическое воздействие от двух схем формирования микрогеометрии шероховатости поверхности, которые соответствуют про-

дольному точению резцом и фрезерованию цилиндрической фрезой (рис. 2).

Исследование влияния колебаний инструмента на образование шероховатости поверхности, целесообразно было рас-

сматривать исходя из двух расчетных схем формирования профиля шероховатости в плоскости параллельной и перпендикулярной оси заготовки (рис. 1).

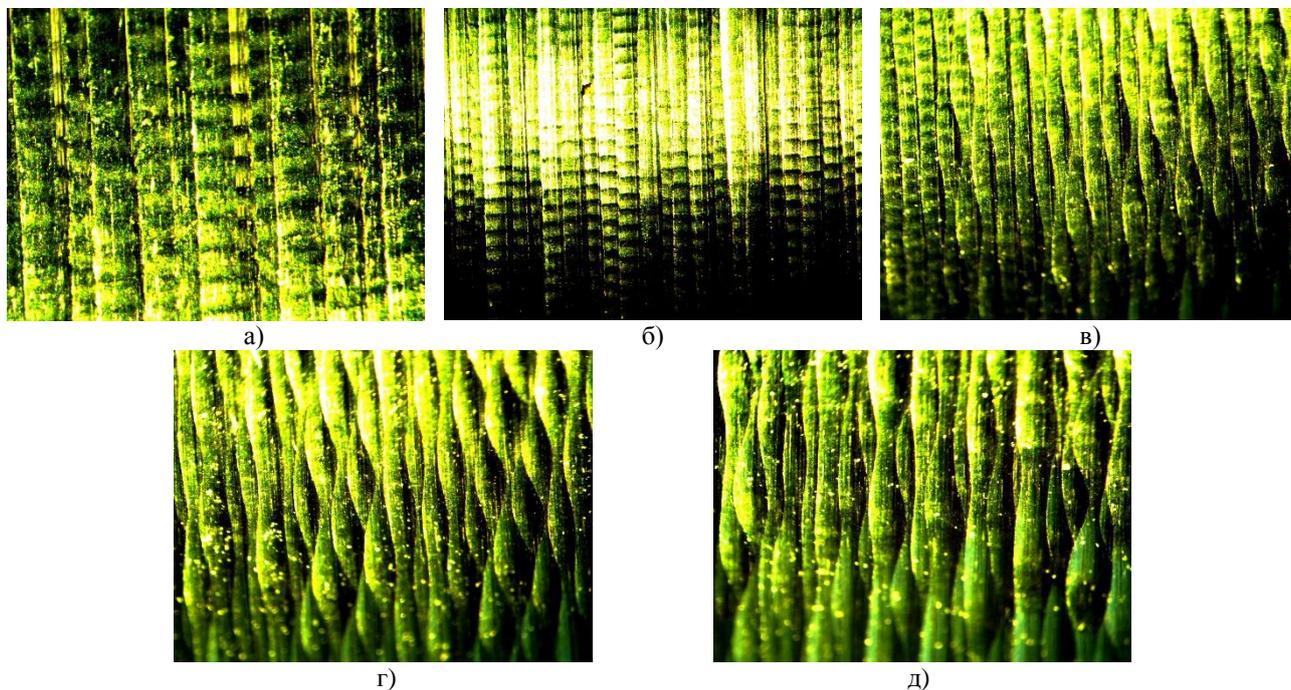


Рис. 1. Следы воздействия вибрационного точения при амплитуде $A = 100 \text{ мкм}$ и частотах: а – $f = 25 \text{ Гц}$; б – $f = 20 \text{ Гц}$; в – $f = 15 \text{ Гц}$; г – $f = 10 \text{ Гц}$; д – $f = 5 \text{ Гц}$
 Fig. 1. Traces of vibration turning at amplitude $A = 100 \text{ }\mu\text{m}$ and frequencies: а – $f = 25 \text{ Hz}$; б – $f = 20 \text{ Hz}$; в – $f = 15 \text{ Hz}$; г – $f = 10 \text{ Hz}$; д – $f = 5 \text{ Hz}$

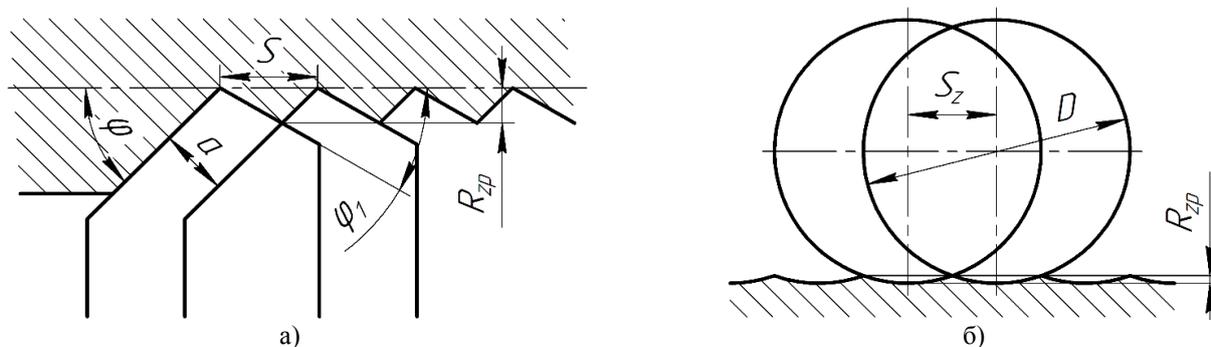


Рис. 2. Схема расчета микропрофиля обработанной поверхности: а – при точении; б – при фрезеровании
 Fig. 2. Calculation scheme of the microprofile of the treated surface: а – during turning; б – during milling

Первая из них отражала движение инструмента при обычном точении без наложения колебаний, вторая отражала влияние на кинематику резания колебаний резца и соответствовала схеме формирования шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой [23].

Очевидно, из рис. 1, поверхность после вибрационного точения имеет шероховатость чешуевидной формы. По результатам геометрического 3D-моделирования

поверхностей в программе КОМПАС-3D, сгенерированных на различных частотах колебаний по проведенным экспериментам по вибрационному точению, были получены следующие изображения (рис. 3).

По представленным изображениям поверхностей, очевидно, что поверхность формировалась за счет комплексного механического воздействия режущего инструмента на обрабатываемую поверхность, которое включало в себя продоль-

ное движение подачи, тангенциальную A_t и нормальную A_r составляющую колебаний. Таким образом, осуществлялось формирование чешуевидного микропрофиля, имеющего элементы, характерные как для точения, так и для фрезерования. Однако,

стоит отметить, что такой характер формирования микронеровности поверхности возможен лишь при строго определенных сочетаниях режимов резания и амплитудно-частотных характеристик тангенциальных маятниковых колебаний.

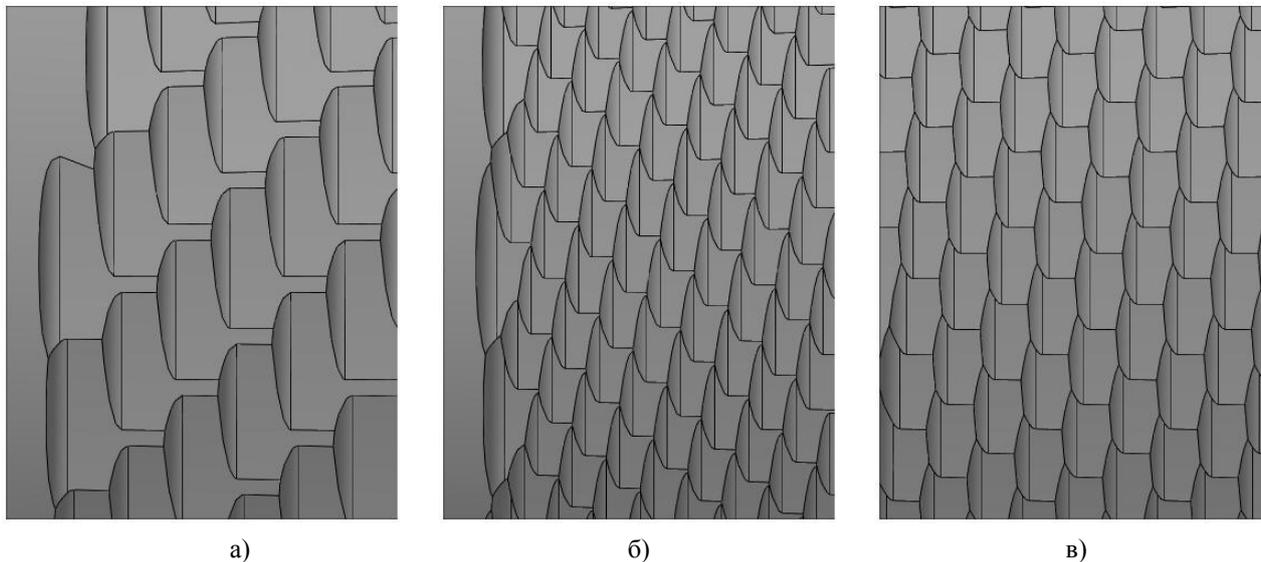


Рис. 3. Вид поверхностей при 3D-моделировании: а – $A = 10$ мкм, $f = 23,9$ Гц;
б – $A = 50$ мкм, $f = 80$ Гц; в – $A = 70$ мкм, $f = 70$ Гц

Fig. 3. Surface appearance in 3D modeling: a – $A = 10$ microns, $f = 23.9$ Hz; b – $A = 50$ microns, $f = 80$ Hz; c – $A = 70$ microns, $f = 70$ Hz

Заключение

Моделирование геометрии поверхностного слоя при вибрационном резании, вызывающее существенно большие трудности, с помощью нейронных сетей не производилось. Анализ трехмерной топографии микрорельефа поверхности деталей машин с помощью нейронных сетей до настоящего времени не производился. Таким образом, из анализа современного состояния исследований можно сделать вывод о целесообразности создания интеллектуальной системы обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин на основе искусственных нейронных сетей, позволяющей обеспечивать на поверхности детали регулярный микрорельеф заданной формы при требуемой степени, глубине. Создание подобной системы требует проведения дополнительных исследований. Научная новизна исследований заключается в том, что будут получены нейросетевые модели, позволяющие по заданной форме регулярного микрорельефа, степени, глубине поверхностного слоя

определять режимы обработки поверхности.

Обусловлено это тем фактом, что получить аналитические зависимости между режимами виброрезания с маятниковыми колебаниями инструмента и формой получаемого микрорельефа достаточно сложно. Именно поэтому представляется перспективным использовать для выявления взаимосвязей искусственные нейронные сети. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными путем обобщения. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

В настоящее время создано большое количество разновидностей архитектур искусственных нейронных сетей, существенно отличающихся по своим возможностям. Поэтому возникает необходимость

экспериментального апробирования существующих типов искусственных нейронных сетей с точки зрения применения их для решаемых задач, после чего модели, показавшие наиболее качественные ре-

зультаты на предварительных датасетах, будут уточняться с целью выбора наилучшего типа для каждой решаемой задачи. Предполагаемая схема работы интеллектуальной системы представлена на рис. 4.



Рис. 4. Предполагаемая схема функционирования интеллектуальной системы обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин

Fig. 4. The proposed scheme of the intelligent quality assurance system for the surface layer of machine parts

На основе обученных нейросетей предполагается реализовать интеллектуальную систему обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин. При работе с данной системой конструктору будет достаточно, например, нарисовать подобную картину рельефа, которая ему нужна, указать диаметр заготовки и геометрию инструмента, чтобы система вы-

полнила прогноз значений требуемых параметров вибрационного резания, которая позволит получить заданный микрорельеф. Разработанная технология позволит получать на поверхности деталей требуемый регулярный микрорельеф, степень, глубину, обеспечивающие им необходимые эксплуатационные характеристики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1982. 247 с.
2. Красный В.А., Максаров В.В. Триботехнические характеристики деталей горных машин с регулярной микрогеометрией поверхности // Металлообработка. 2016. №1 (91). С. 29-35.
3. Caixu Yue, Haining Gao, Xianli Liu, Steven Y. Liang Part Functionality Alterations Induced by Changes of Surface Integrity in Metal Milling Process: A Review // Applied Science. 2018. 8. 2550. 18 p. – doi:10.3390/app8122550.
4. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В. Управление киберфизическими механообрабатывающими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 292 с.
5. J. Wang and A. Kusiak Computational Intelligence in Manufacturing Handbook, CRC Press, Boca Raton, FL, 2001, 512 p.
6. S. Awasthi, M. Carlos Travieso-Gonzalez, S. Goutam Artificial Intelligence for a Sustainable Industry 4.0., Springer, 2021, 311 p.
7. Акинин М.В., Никифоров М.Б., Таганов А.И. Нейросетевые системы искусственного интеллекта в задачах обработки изображений. М.: Горячая линия Телеком, 2017. – 152 с.
8. Шелковников Е.Ю., Тюриков А.В., Гуляев П.В., Осипов Н.И. Классификация изображений наноструктуры поверхности с применением нейро-нечеткой сети // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, №2. С. 326-332.
9. Sinha, A., Bai, J., Ramani, K. Deep Learning 3D Shape Surfaces Using Geometry Images. In: Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. Computer Vision – European Conference on Computer Vision 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9910. Springer, Cham. – doi.org/10.1007/978-3-319-46466-4_14
10. Медведева О.И. Управление качеством обработанной поверхности при резании на основе искусственного интеллекта. Дисс. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2002. 175 с.
11. Баранов Д.С., Дуюн Т.А. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования шероховатости при чистовом и получистовом точении // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2019. №7. С. 128-134. - DOI: 10.34031/article_5d35d0b62dc823.22670125
12. Anuja B., Kirubakaran T., Ranjit L. Surface Roughness Prediction using Artificial Neural Network in Hard Turning of AISI H13 Steel with Minimal Cutting Fluid Application // Procedia Engineering, 2014. pp. 205-211. – doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.243.

13. Asiltürk I., Çunkaş M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert systems with applications*, 2011. – vol. 32. – I. 5. – pp. 5826-5832. doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.041.
14. Hashmi M.S.J. An optical method and neural network for surface roughness measurement // *Optics and Lasers in Engineering*, 1998. Vol. 29. I. 1. pp. 1-15. – doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00088-2.
15. Quintana G., Garcia-Romeu M.L., Ciurana J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations // *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011. Vol. 22. pp. 607-617 – doi.org/10.1007/s10845-009-0323-5
16. Huaian Yi, Jian Liu, Peng Ao, Enhui Lu, Hang Zhang Visual method for measuring the roughness of a grinding piece based on color indice // *Optics Express*, 2016. Vol. 24. I. 15. pp. 17215-17233. – 10.1364/OE.24.017215.
17. Samta G. Measurement and evaluation of surface roughness based on optic system using image processing and artificial neural network // *International Journal Advencher Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 73. pp. 353-364. – 10.1007/s00170-014-5828-1.
18. Алтунин К.А., Соколов М.В. Применение нейронных сетей для моделирования процесса

токарной обработки // *Вестник ТГТУ*. 2016. №1. С. 122-133.

19. Vrabe M., Mankova I., Beno J., Tuharsky J. Surface roughness prediction using artificial neural networks when drilling Udimet 720 // *Procedia Engineering*, 2012. Vol. 48. pp. 693-700. 10.1016/j.proeng.2012.09.572.
20. Boukezzi F., Noureddine R., Benamar A., Nouredine F. Modelling, prediction and analysis of surface roughness in turning process with carbide tool when cutting steel C38 using artificial neural network. // *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2017. Vol. 26. No. 4. pp. 567-583.
21. Vladimirov A., Afonin A., Makarov A. and Titova A., Revisiting the tangential oscillations of the tool to form the microrelief of the workpiece surface. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2020. vol. 32. pp. 1–5. – doi.org/10.21595/vp.2020.21361
22. Владимиров А.А., Афонин А.Н., Макаров А.В., Назарова М.Ю. Геометрическая модель шероховатости при точении с маятниковыми колебаниями резца // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2019. № 4-1 (336). С. 15-19.
23. Владимиров А.А., Афонин А.Н., Макаров А.В. Особенности механизма формирования микронеровности поверхности при вибрационном точении // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019. № 2. С. 27-29.

REFERENCES

1. Schneider YuG. Operational properties of parts with regular microrelief. Leningrad: Mashinostroenie; 1982.
2. Krasny VA, Maksarov VV. Tribotechnical characteristics of mining machine parts with regular surface microgeometry. *Metalworking*. 2016;1(91):29-35.
3. Caixu Yu, Haining G, Xianli L, Steven Y. Liang part functionality alterations induced by changes of surface integrity in metal milling process: review. *Applied Science*. 2018;8(2550):18. doi:10.3390/app8122550.
4. Kabaldin YuG, Shatagin DA, Kolchin PV. Management of cyberphysical machining systems in digital production based on artificial intelligence and cloud technologies. Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie; 2019.
5. Wang, Kusiak A. Computational intelligence in manufacturing: handbook. CRC Press, Boca Raton, FL; 2001.
6. Awasthi S, Carlos Travieso-Gonzalez M, Goutam S. Artificial intelligence for a sustainable industry 4.0. Springer; 2021.
7. Akinin MV, Nikiforov MB, Taganov AI. Neural network systems of artificial intelligence in image processing tasks. Moscow: Hotline Telecom; 2017.
8. Shelkovnikov EYu, Tyurikov AV, Gulyaev PV, Osipov NI. Classification of surface nanostructure images using a neuro-fuzzy network. *Chemical*

Physics and Mesoscopics. 2017;19(2):326-332.

9. Sinha A, Bai J, Ramani K. Deep learning 3D shape surfaces using geometry images. In: Leibe B, Matas J, Sebe N, Welling M. *Computer vision – European Conference on Computer Vision 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9910. Springer; Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-46466-4_14
10. Medvedeva OI. Quality management of the treated surface during cutting based on artificial intelligence [dissertation]. [Komsomolsk-on-Amur (RF)]; 2002.
11. Baranov DS, Duyun TA. Use of artificial neural networks for predicting roughness during finishing and semi-finishing turning. *Bulletin of BSTU named after VG. Shukhov*. 2019;7:128-134. DOI: 10.34031/article_5d35d0b62dc823.22670125
12. Anuja B, Kirubakaran , Ranjit L. Surface roughness prediction using artificial neural network in hard turning of AISI H13 steel with minimal cutting fluid application. *Procedia Engineering*, 2014:205-211. doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.243.
13. Asiltürk I, Çunkaş M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications*. 2011;32(5):5826-5832. doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.041.
14. Hashmi MSJ. An optical method and neural network for surface roughness measurement. *Optics*

- and Lasers in Engineering. 1998;29(1):1-15. doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00088-2.
15. Quintana G, Garcia-Romeu ML, Ciurana J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2011;22:607-617. doi.org/10.1007/s10845-009-0323-5
 16. Huaian Yi, Jian Liu, Peng Ao, Enhui Lu, Hang Zhang Visual method for measuring the roughness of a grinding piece based on color indice. *Optics Express*. 2016;24(15):17215-17233.
 17. Samta G. Measurement and evaluation of surface roughness based on optic system using image processing and artificial neural network. *International Journal Advencher Manufacturing Technology*. 2014;73:353-364.
 18. Altunin KA, Sokolov MV. Application of neural networks for modeling turning. *Transactions of the TSTU*. 2016;1:122-133.
 19. Vrabe M, Mankova I, Beno J, Tuharsky J. Surface roughness prediction using artificial neural networks when drilling Udimet 720. *Procedia Engineering*. 2012;48:693-700.
 20. Boukezzi F, Nouredine R, Benamar A, Nouredine F. Modelling, prediction and analysis of surface roughness in turning process with carbide tool when cutting steel C38 using artificial neural network. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2017;26(4):567-583.
 21. Vladimirov A, Afonin A, Makarov A, Titova A. Revisiting the tangential oscillations of the tool to form the microrelief of the workpiece surface. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2020;32:1–5. doi.org/10.21595/vp.2020.21361
 22. Vladimirov AA, Afonin AN, Makarov A, Nazarova MYu. Geometric model of roughness during turning with pendulum vibrations of a cutter. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2019;4-1 (336):15-19.
 23. Vladimirov AA, Afonin AN, Makarov AV. Features of the mechanism of forming microroughnesses of the surface during vibration turning. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019;2:27-29.

Информация об авторах:

Владимиров Александр Андреевич – кандидат технических наук, тел. +79205605185, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57214578618, Research- ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-РИНЦ 818516.

Vladimirov Aleksandr Andreevich – Candidate of Technical Sciences, phone: +79205605185, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht; international identification numbers of the author: Scopus-Author ID 57214578618, Research-ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-RSCI 818516.

Цыганков Юрий Александрович – кандидат технических наук, тел. +79205938243, доцент кафедры автоматизированных и информационных систем управления им. Ю.И. Ерёменко, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57190176274, Research- ID-Web of Science S-8950-2016, Author-ID-РИНЦ 850399.

Tsygankov Yury Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, phone: +79205938243, Associate Professor of the Department of Automated and Information Control Systems named after Yu.I. Eremenko, international identification numbers of the author: Scopus-Author ID 57190176274, Research-ID-Web of Science S-8950-2016, Author-ID-RSCI 850399.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 28.02.2025; одобрена после рецензирования 04.03.2025; принята к публикации 26.03.2025. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 28.02.2025; approved after review on 04.03.2025; accepted for publication on 26.03.2025. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.