

УДК 62-932.4

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-16

Повышение точности настольных станков с числовым программным управлением путем применения пространственных демпферов в их станинах

Р. Д. Воронов¹, Д. Г. Левашкин², Д. Ю. Воронов³

^{1,2,3}Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

¹Smr.rom@yandex.ru, ²denis.levden@yandex.ru, ³dmitridmitrie@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы состоит в разработке конструкции пространственного демпфера, интегрируемого в станину настольного станка для повышения жесткости и демпфирующих способностей системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ), и обосновании целесообразности его применения. Актуальность темы обусловлена проблемным характером обеспечения и повышения жесткости металлообрабатывающих станков, особенно малогабаритных. При проектировании любого станка с возможностью обработки твердых и прочных материалов вопросы жесткости и демпфирования колебаний системы СПИЗ имеют решающее значение. Поскольку главным несущим узлом станка является его станина, то акцент был сделан именно на данный узел станка. *Материалы и методы.* Для обоснования целесообразности применения предложенного технического решения выполнен анализ математической модели станка и ее расчетной схемы исходя из сведений о металлоемкости и конструктивных особенностях рассматриваемого пространственного демпфера. Исходным материалом для исследования служит ранее разработанная конструкция станины и научный задел авторов по данному направлению. *Результаты.* Показано, что применение пространственных демпферов в станине настольного станка технически осуществимо и положительно влияет на жесткость и демпфирование всей системы СПИЗ. *Выводы.* Предложенный подход позволит изготавливать настольные станки с требуемой комбинацией показателей демпфирования и жесткости без значительных изменений в их массе и габаритах и повысить точность работы станков.

Ключевые слова: жесткость, демпфирование, интеграл, полимербетон, настольный ЧПУ-станок, точность обработки, армирующие элементы, демпфер

Для цитирования: Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с числовым программным управлением путем применения пространственных демпферов в их станинах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 172–181. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-16

Increasing the accuracy of desktop numerically controlled machines by using spatial dampers in their beds

R.D. Voronov¹, D.G. Levashkin², D.Yu. Voronov³

^{1,2,3} Tolyatti State University, Tolyatti, Russia

¹Smr.rom@yandex.ru, ²denis.levden@yandex.ru, ³dmitridmitrie@yandex.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this work is to describe the proposed design of a spatial damper integrated into the bed of a desktop machine to increase the rigidity and

© Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

damping capabilities of the “machine – device – instrument – workpiece” system, and substantiate the feasibility of its use from a technical point of view. The relevance of the study is due to the problematic nature of ensuring and increasing the rigidity of metalworking machines, especially small ones. When designing any machine tool capable of processing hard and durable materials, the issues of rigidity and vibration damping of the “machine – device – instrument – workpiece” system are critical. Since the main load-bearing unit of the machine is its bed, the emphasis was placed on this particular unit of the machine. *Materials and methods.* To justify the feasibility of using the proposed technical solution, an analysis of the mathematical model of the machine and its design diagram was performed based on information about the metal consumption and design features of the spatial damper under consideration. The source material for the study is the previously developed design of the frame and the scientific groundwork of the authors in this area. *Results.* It has been shown that the use of spatial dampers in the bed of a table-top machine is technically feasible and has a positive effect on the stiffness and damping of the entire “machine – device – instrument – workpiece” system. *Conclusions.* The proposed approach will make it possible to manufacture desktop machines with the required combination of damping and stiffness indicators without significant changes in their weight and dimensions and to improve the accuracy of machine operation.

Keywords: rigidity, damping, synthetic grain, polymer concrete, desktop of numerically controlled machines, precision machining, reinforcing elements, damper

For citation: Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Increasing the accuracy of desktop numerically controlled machines by using spatial dampers in their beds. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):172–181. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-16

Введение

Вопросы обеспечения и повышения жесткости станков являются актуальными, поскольку данная характеристика определяет точность работы и спектр возможного применения станочного оборудования. Это подтверждается современными научными исследованиями [1–3]. И если для крупногабаритных промышленных станков существует обилие конструкторских и технических решений, повышающих жесткость и демпфирование системы станка [4, 5], то для сегмента настольных металлообрабатывающих станков достижение требуемой точности ограничено их пониженной жесткостью и виброустойчивостью. В настоящее время в станкостроении используют различные композитные материалы, из которых изготавливают некоторые узлы станков [6]. Поэтому применение композитных материалов в станкостроении для повышения точности и жесткости станков является перспективным направлением, реализация которого невозможна без научных исследований. Данная работа посвящена исследованию процесса армирования станины станка, которая выполнена в виде интегрированного блока с предварительно напряженными элементами [7]. Таким образом, целью статьи является теоретическое обоснование разработанной конструкции демпфера и анализ возможностей его практического применения для повышения точности обработки на настольных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Материалы и методы

Настоящая публикация является развитием основных теоретических положений и разработок, изложенных в работе [8], где предложен способ по-

вышения жесткости настольного станка путем внедрения в его полимербетонную станину армирующих элементов особой формы в состоянии предварительного натяга. В данной работе сохраняется концепция особой формы армирующих элементов, но, в отличие от известной конструкции, предлагается в синтеграновой станине размещать специальные закладные элементы, так называемые пространственные демпферы (рис. 1).

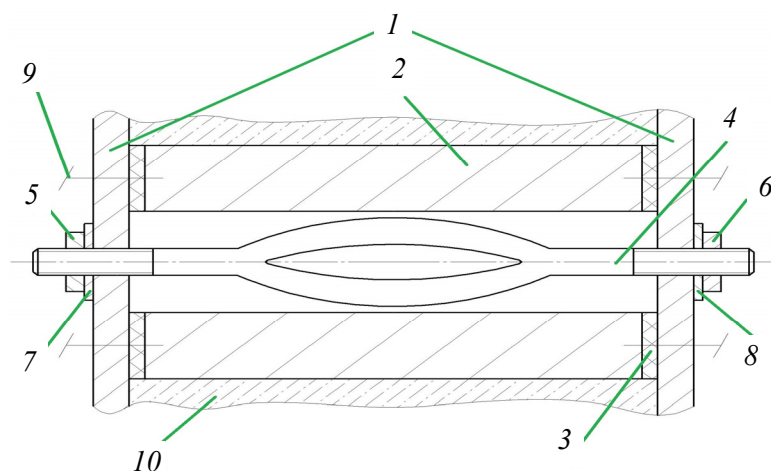


Рис. 1. Схема пространственного демпфера: 1 – базовые плиты станины; 2 – корпус-труба; 3 – уплотнение; 4 – пространственный демпфер; 5, 6 – гайки; 7, 8 – шайбы, 9 – винты, 10 – синтегран (полимербетон)

Пространственный демпфер устанавливают в отверстия, выполненные в боковых элементах станины (стальных торцах) 1 настольного фрезерного станка с ЧПУ. Пространственный демпфер имеет различную геометрию и конфигурацию в зависимости от требований по обеспечению жесткости, например, содержит жесткую часть в виде корпуса-трубы 2, уплотнения 3 и демпфирующей части, выполненной в виде пространственного демпфера 4 специальной формы. Более подробно конструктивная форма демпфера представлена на рис. 2. При этом пространственный демпфер 4 устанавливают с предварительным натягом, который создают при помощи резьбовых поверхностей демпфера (рис. 1) и гаек 5 и 6, а также шайб 7 и 8, причем торцы шайб упираются в боковые элементы станины 1 и обеспечивают силовое замыкание контура, что обуславливает повышенную жесткость конструкции и сохранение напряженного состояния пространственного демпфера 4.

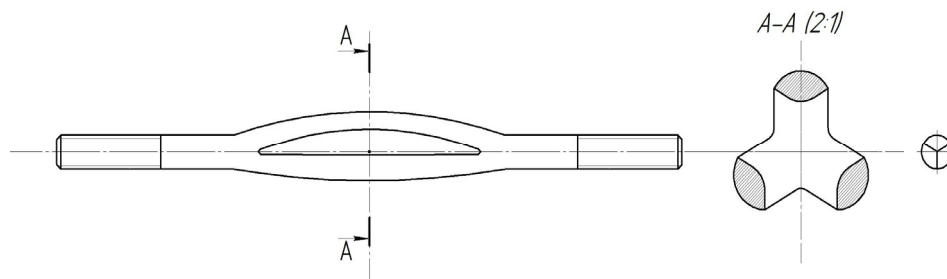


Рис. 2. Форма пространственного демпфера

Величина натяга демпфера 4 (рис. 1) может варьироваться в достаточно широких пределах, она устанавливается исходя из предполагаемой амплитуды колебаний технической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ). Чем выше амплитуда колебаний системы, тем больше должна быть величина предварительного натяга. Так как колебания системы СПИЗ носят гармонический характер, то натяг пространственного демпфера 4 будет гасить как положительную, так и отрицательную составляющие возникающих колебаний. В отличие от армирующих элементов с эллипсоидным участком, приведенных в работе [8], за счет своей формы (см. рис. 2) пространственный демпфер 4 позволит гасить колебания не по двум, а сразу по трем осям, обеспечивая, таким образом, пространственное демпфирование. Корпус-трубу 2 прикрепляют к боковым элементам станины 1 при помощи винтов 9. После этого производят заливку синтеграновой смеси 10 в полость станины фрезерного станка с ЧПУ, при этом внутренняя полость пространственных демпферов в сборе окажется свободной от синтегранов 10. Таким образом, синтегран 10 будет непосредственно контактировать только с наружной частью корпуса-трубы 2, которая является неподвижной. Благодаря этому со временем не будет происходить разрушение приграничных слоев синтегранов от колебаний напряженного пространственного демпфера. Количество пространственных демпферов зависит от массово-габаритных характеристик станка и требуемой величины жесткости системы СПИЗ, но не может быть менее двух.

Изучим влияние армирующих элементов в виде пространственных демпферов на точность, жесткость и демпфирующие возможности настольных фрезерных станков, используя математическую модель. Расчетную схему фрезерного станка с ЧПУ (рис. 3) и математическую модель примем аналогичной, представленной в работе [8], так как объект исследования один и тот же. Параметры математической модели были определены на основе исходных данных о материале демпфирующего элемента и его геометрии.

Разработанная математическая модель соответствует компоновке горизонтально-фрезерного настольного станка. Ее расчетная схема представляет собой дискретную упруго-массовую систему, описываемую следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -m_6\ddot{x}_6 + b_6(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) + c_6(x_7 - x_6) = F_{\text{рез}}, \\ m_4\ddot{x}_4 + b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + c_4(x_4 - x_3) = F_{\text{рез}}, \\ m_3\ddot{x}_3 - b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + b_3(x_3 - x_2) - c_4(x_4 - x_3) + c_3(x_3 - x_2) = 0, \\ m_2\ddot{x}_2 - b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + b_2(x_2 - x_1) + c_2(x_2 - x_1) - c_3(x_3 - x_2) = 0, \\ m_1\ddot{x}_1 - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + b_1\dot{x}_1 - c_2(x_2 - x_1) + c_1x_1 - c_9(x_1 - x_9) - b_9(\dot{x}_1 - \dot{x}_9) = 0, \\ m_9\ddot{x}_9 - b_9(\dot{x}_1 - \dot{x}_9) + b_8(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) + c_8(x_9 - x_8) - c_9(x_1 - x_9) = 0, \\ m_8\ddot{x}_8 - b_8(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) + b_7(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - c_8(x_9 - x_8) + c_7(x_8 - x_7) = 0, \\ m_7\ddot{x}_7 + b_6(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) - b_7(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) + c_6(x_7 - x_6) - c_7(x_8 - x_7) = 0, \end{cases}$$

где m – масса элемента; x – перемещение элемента и производные перемещения; b – коэффициент демпфирования узла; c – коэффициент жесткости.

Два уравнения из системы содержат параметр $F_{рез}$, который обозначает величину силы резания, пространственно ориентированной при фрезеровании и имеющей наибольшую составляющую в продольном направлении [9].

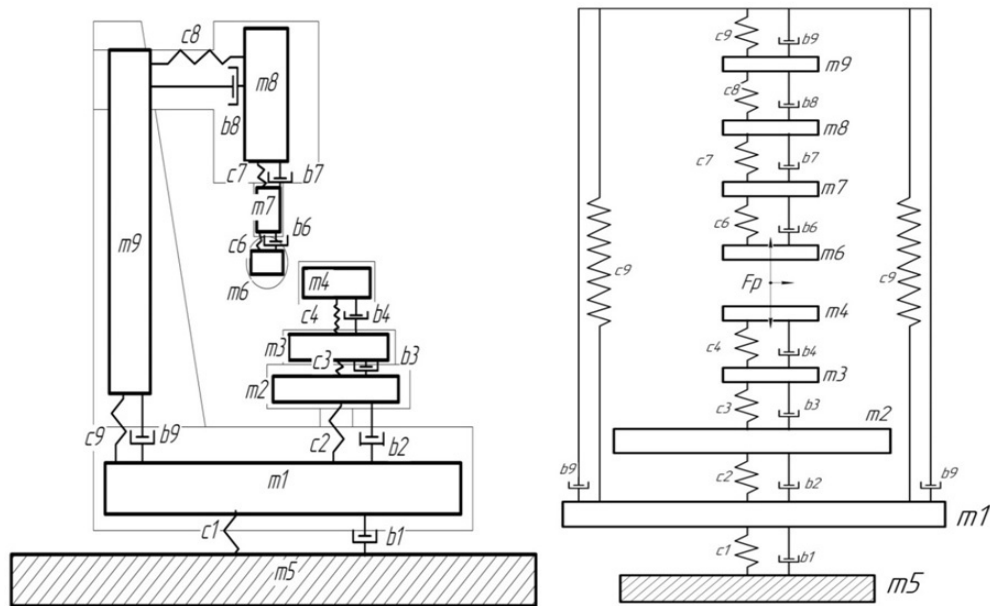


Рис. 3. Расчетная схема математической модели настольного станка:
1 – станина; 2 – столик; 3 – приспособление; 4 – заготовка; 5 – основание;
6 – инструмент; 7 – шпиндель; 8 – фрезерная бабка; 9 – стойки

С помощью математической модели оценим изменение демпфирующих свойств системы СПИЗ после замены интеграновой станины с известными прямыми армирующими элементами на ту же станину, но с установкой предложенных пространственных демпферов, при неизменности прочих входных данных модели. Для этого необходимо приложить к системе возмущающую силу, которой является сила резания.

В обоих случаях приложенные силы выбраны специально не равными друг другу, так как жесткости систем не одинаковы, но требуется получить одинаковую амплитуду на входе для количественной оценки демпфирования. Величины прикладываемых сил составляют 2 кН для пространственных демпферов и 1,4 кН для прямых стержней в станине соответственно. Разница прикладываемых сил для получения равных амплитуд на входе зависит от выбранной толщины стенки трубы в конструкции демпфера. Конструктивно примем минимальную толщину стенки, необходимую для надежного закрепления труб на торцах станины равную 9 мм. Диаметр демпфера и диаметры прямолинейных армирующих элементов принимаем равными 30 мм. Полученные для заданных выше условий графики перемещений отображены на рис. 4.

Данные графические зависимости были построены при использовании САЕ-системы *Simulation X* в результате последовательного приложения двух возмущающих сил в точке между блоками с индексациями 4 и 6 (инструмента и заготовки) на расчетной схеме математической модели.

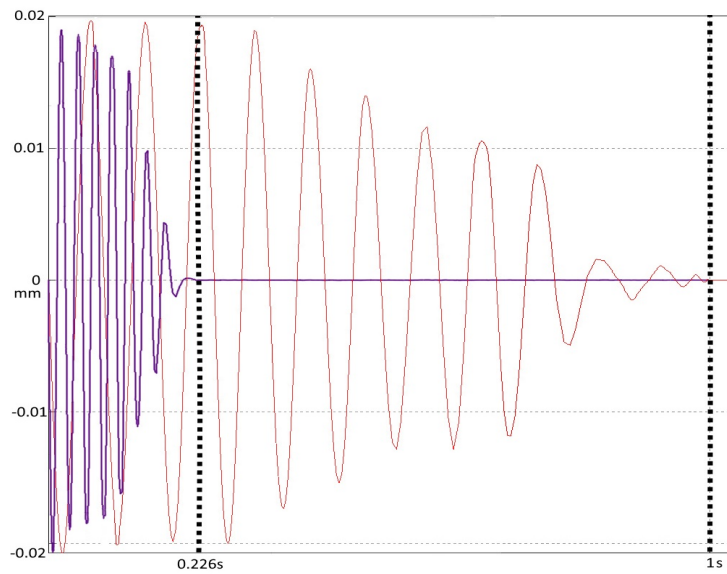


Рис. 4. Зависимости перемещений в системе СПИЗ от времени:
 темный график – синтеграновая станина с предложенными
 пространственными демпферами; светлый – синтеграновая станина
 с армирующими элементами в виде прямолинейных стержней

Для оценки возможности установки пространственного демпфера в уже разработанную конструкцию станины станка проведем ее расчет на жесткость методом конечных элементов. Поскольку конструкция станины симметрична и имеет на своих торцах одинаковые базовые стальные плиты, то допустимо провести расчет лишь одной из плит. Соответствующий результат расчета представлен на рис. 5.

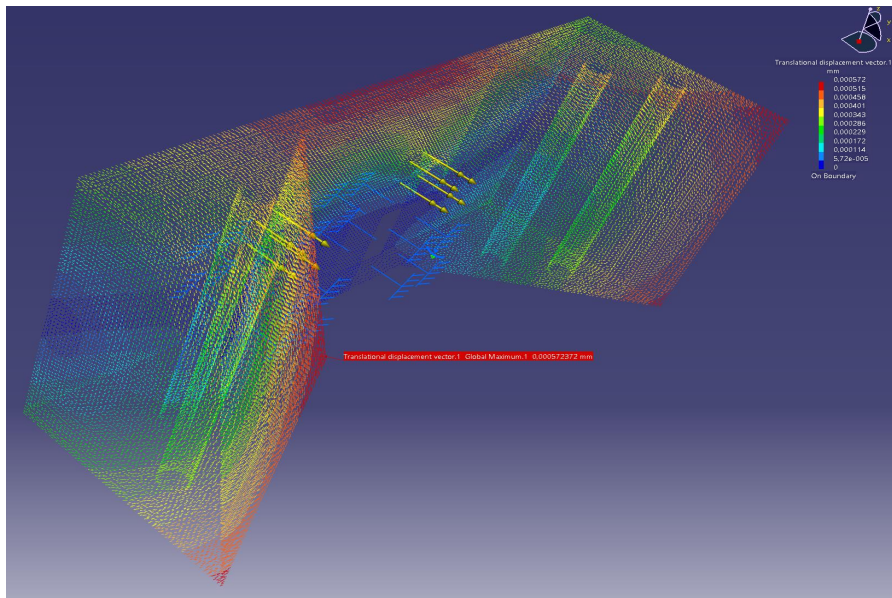


Рис. 5. Результат расчета на жесткость несущего элемента станины
 методом конечных элементов (наибольшее перемещение – 0,0006 мм)

Данный расчет соответствует установке в станину станка двух пространственных демпферов, каждый из которых нагружен силой 1 кН. В качестве материала торцевой плиты использовалась конструкционная сталь.

Результаты

В результате анализа расчетной и математической моделей установлено: во-первых, масса станины m_1 за счет применения закладных элементов в виде пространственных демпферов существенно не возрастает (не более чем на 10 %), что положительно сказывается на массово-габаритных параметрах станка и не предъявляет дополнительных требований к местам установки таких станков; во-вторых, форма демпферов существенно увеличивает величину коэффициента демпфирования b за счет пространственного демпфирования, обеспечивая быструю компенсацию перемещений x (применение пространственных демпферов увеличивает демпфирующие свойства приблизительно в 4,5–5 раз по сравнению со станиной с известными закладными элементами); в-третьих, за счет применения предложенных армирующих элементов обеспечивается реализация силового замыкания на несущие элементы конструкции станины.

Станина в таком случае не потребует доработок и внесения конструктивных изменений, поскольку применение пространственного демпфера не приводит к значительным деформациям или перегрузке ее базовых торцевых элементов, что подтверждают результаты расчета на жесткость станины станка методом конечных элементов.

Обсуждение

Полученные результаты могут быть применены в сферах станкостроения и металлообработки на настольных станках, широко используемых средними и малыми промышленными предприятиями [10]. Предложенный способ повышения жесткости при разработке станка позволяет обеспечить любое сочетание показателей жесткости и точности при сохранении массово-габаритных показателей станка практически неизменными. Последующие исследования будут направлены на разработку технологии изготовления пространственных конструкций демпферов, оптимизацию их геометрии и конфигурации применительно к разным требованиям для обеспечения требуемой жесткости станка, а также будет уделено внимание вопросам количественной оценки его технических характеристик, поскольку необходимо более точно выявить влияние геометрии и формы демпфера на другие динамические характеристики станка, в том числе частотные.

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что применение закладных элементов в виде пространственных демпферов в конструкции интегральной станины настольного станка способнократно повысить точность настольных фрезерных станков с ЧПУ за счет увеличения жесткости и демпфирующей способности станины. Предложенная конструкция пространственных демпферов позволяет осуществлять демпфирование по трем осям, что в совокупности с высокими демпфирующими свойствами самого интеграла приводит к значительному снижению вибраций. Демпфирующие способности системы СПИЗ от применения предложенных демпферов повышаются в 4–5 раз. При

использовании корпуса-трубы демпфера с толщиной стенки 9 мм жесткость системы повышается на 40 %. Кроме того, данная конструкция позволяет увеличить срок службы станины из данного композита за счет изоляции колеблющихся элементов демпфера от хрупкого синтегранна, что предотвращает внутреннее растрескивание полимербетонной основы. Изучение влияния формы и геометрии армирующих элементов синтеграновой станины создает предпосылки для проектирования станков с заданными параметрами точности и жесткости.

Список литературы

1. Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р., Пыркова О. Д. Методы определения и повышения технологической жесткости токарных станков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18, № 3. С. 87–92.
2. Денисенко А. Ф., Якимов М. В., Борисова К. Р. Анизотропия радиальной жесткости расточки корпуса под опоры шпинделя токарного станка // Транспортное машиностроение. 2021. № 5. С. 23.
3. Гаймалов А. Ф., Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р., Красников И. П., Сайдуганов А. Р. Методика измерения жесткости станков с ЧПУ // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. Уфа : Изд-во Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. С. 313–317.
4. Nikonova T., Sinko A., Yurchenko V., Berg A. Analysis of the use of the polymer concrete for the production of machine tool base parts // Труды университета. 2022. № 1. Р. 24.
5. Жуковец П. Г., Жолобов А. А., Шатуров Г. Ф. К вопросу эффективного использования современных токарных центров // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. № 1. С. 36.
6. Абикеев А. Возможности применения композиционных материалов в машиностроении // Инновации в технологиях и образовании : сб. ст. участников VIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 5 ч. (Белово, 5–6 марта 2015 г.). Белово : Филиал «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г. Белово, Великотырновский университет им. Святых Кирилла и Мефодия, 2015. Ч. 1. С. 65–69.
7. Кибенко А. С., Берг А. А. Композиционные материалы для изготовления металло-режущих станков // International Innovation Research : сб. ст. XIX Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2019. С. 27–29.
8. Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с ЧПУ путем применения нагруженных армирующих элементов в их станине // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 3 (129). С. 1–11. doi: 10.23670/IRJ.2023.129.27
9. Завистовский С. Э. Обработка материалов резанием : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 448 с.
10. Шевелев И. В. Разработка трехкоординатного фрезерного станка с ЧПУ центра «Формула Станок» : магистерская диссертация / Тольяттинский государственный университет. Тольятти, 2019. 124 с.

References

1. Kudoyarov R.G., Basharov R.R., Pyrkova O.D. Methods for determining and increasing the technological rigidity of lathes. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2014;18(3):87–92. (In Russ.)
2. Denisenko A.F., Yakimov M.V., Borisova K.R. Anisotropy of the radial rigidity of the body boring for lathe spindle supports. *Transportnoe mashinostroenie* = *Transport engineering*. 2021;(5):23. (In Russ.)

3. Gaymalov A.F., Kudoyarov R.G., Basharov R.R., Krasnikov I.P., Sayduganov A.R. Methodology for measuring the stiffness of numerical controlled machines. *Stankostroenie i innovatsionnoe mashinostroenie. Problemy i točki rosta = Machine tool building and innovative mechanical engineering. Problems and growth points*. Ufa: Izd-vo Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskyy universitet, 2019:313–317. (In Russ.)
4. Nikonova T., Sinko A., Yurchenko V., Berg A. Analysis of the use of the polymer concrete for the production of machine tool base parts. *Trudy universiteta = Proceedings of the University*. 2022;(1):24.
5. Zhukovets P.G., Zholobov A.A., Shaturov G.F. On the issue of effective use of modern turning centers. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2020;(1):36. (In Russ.)
6. Abikeev A. Possibilities of using composite materials in mechanical engineering. *Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii: sb. st. uchastnikov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 5 ch. (Belovo, 5–6 marta 2015 g.) = Innovation in technology and education: proceedings of the 8th International scientific and practical conference: in 5 parts (Belovo, March 5-6, 2015)*. Belovo: Filial «Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet imeni T.F. Gorbacheva» v g. Belovo, Velikotymovskiy universitet im. Svyatykh Kirilla i Mefodiya, 2015;Pt.1:65–69. (In Russ.)
7. Kibenko A.S., Berg A.A. Composite materials for the manufacture of metal cutting machines. *International Innovation Research: sb. st. XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = International Innovation Research: proceedings of the 19th International scientific and practical conference*. Penza, 2019:27–29. (In Russ.)
8. Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Improving the accuracy of desktop numerical controlled machines by using loaded reinforcement elements in their bed. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2023;(3):1–11. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2023.129.27
9. Zavistovskiy S.E. *Obrabotka materialov rezaniem: ucheb. posobie = Processing of materials by cutting: textbook*. Moscow: INFRA-M, 2023:448. (In Russ.)
10. Shevelev I.V. Razrabotka trekhkoordinatnogo frezernogo stanka s ChPU tsentra “Formula Stanok”: masterskaya dissertatsiya / *Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet = Development of a three-coordinate CNC milling machine at the “Formula Stanok” center: dissertation to apply for the master's degree* / Togliatti State University. Tol'yatti, 2019:124. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Дмитриевич Воронов

студент, Тольяттинский
государственный университет (Россия,
Самарская область, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: Smr.rom@yandex.ru

Roman D. Voronov

Student, Togliatti State University
(14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Денис Геннадьевич Левашкин

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры оборудования
и технологии машиностроительного
производства, Тольяттинский
государственный университет (Россия,
Самарская область, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: denis.levden@yandex.ru

Denis G. Levashkin

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of equipment
and technology of mechanical engineering,
Togliatti State University (14 Belorusskaya
street, Togliatti, Russia)

Дмитрий Юрьевич Воронов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры оборудования
и технологии машиностроительного
производства, Тольяттинский
государственный университет (Россия,
Самарская область, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: dmitridmitrie@yandex.ru

Dmitriy Yu. Voronov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of equipment
and technology of mechanical engineering,
Togliatti State University (14 Belorusskaya
street, Togliatti, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 14.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 26.09.2023

Принята к публикации / Accepted 10.11.2023