

УДК 625.144

DOI 10.17513/snt.39613

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ В ПУТИ

Хвостиков А.С.*ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: Knastu@list.ru*

Восстановление поверхности пути возможно только с помощью шлифования поверхности рельсов. Повысить скорость шлифования рельсов возможно при переходе на высокоскоростную обработку. В настоящее время существует запрос на повышение скорости обработки до 30 км/час и снимаемую толщину поврежденного слоя до 0,15 мм. Шлифование при переходе на высокоскоростную обработку сталкивается со следующими проблемами: стойкость и прочность режущего инструмента, обеспечение поддержки опорных поверхностей вала, отвод тепла от электродвигателя и подшипников. В качестве альтернативы предлагается использовать турбинный привод. Проанализировав различные виды опор для высокоскоростного шпинделя, предлагается заменить подшипники качения на бесконтактные газостатические с магнитной разгрузкой шпинделя. В статье представлена перспективная методика шлифования рельсов высокоскоростной рельсошлифовальной машинкой, применение которой позволит сократить время простоя, повысив скорость обработки до 30 км/ч. Наиболее перспективным является использование турбинного привода, опирающегося на передний газомангнитный подшипник и задний газостатический подшипник. Нагружение шлифовального круга производится газостатическим подпятником. В ходе исследования была спроектирована принципиальная конструкция рельсошлифовальной машинки с частотой вращения 50 000 мин⁻¹ и нагрузкой шлифовального круга 3 кН.

Ключевые слова: рельсошлифовальный поезд, высокоскоростной шпиндель, газомангнитный подшипник, турбинный привод, высокоскоростная обработка

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-SPEED GRINDING OF RAILS IN TRANSIT

Khvostikov A.S.*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: knastu@list.ru*

Restoration of the track surface is possible only by grinding the surface of the rails. It is possible to increase the grinding speed of rails when switching to high-speed processing. Currently, there is a request to increase the processing speed to 30 km/h and the removable thickness of the damaged layer to 0.15 mm. Grinding during the transition to high-speed processing faces the following problems: durability and strength of the cutting tool, and providing support for the bearing surfaces of the shaft, heat removal from the electric motor and bearings. As an alternative, it is proposed to use a turbine drive. Having analyzed various types of supports for a high-speed spindle, it is proposed to replace rolling bearings with non-contact gas-static bearings with magnetic spindle unloading. The article presents a promising method of rail grinding with a high-speed rail grinding machine, the use of which will reduce downtime by increasing the processing speed to 30 km/h. The most promising is the use of a turbine drive based on a front gas-magnetic bearing and a rear gas-static bearing. The grinding wheel is loaded by a gas-static bearing. In the course of the study, the basic design of a rail grinding machine with a rotation speed of 50,000 min⁻¹ and a grinding wheel load of 3 kN was designed.

Keywords: rail grinding train, high-speed spindle, gas magnetic bearing, turbine drive, high-speed machining

В настоящее время в России растет доля перевозок, осуществляемых железнодорожным транспортом. В «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» предусмотрено как строительство новых дорог, так и обновление уже имеющихся систем железнодорожного сообщения. Увеличивающийся объем грузоперевозок, ведущий к увеличению грузонапряженности, повышение межосевых нагрузок подвижного состава и скоростей современных железнодорожных магистралей ведут к активному износу полотна [1]. Кроме строительства новых и модернизации имеющихся дорог, активно ведутся работы по поддержанию в работоспособном состоянии имеющегося железнодорожного пути.

Под действием высоких значений контактных напряжений происходит образование на поверхности рельсов различных дефектов, изменение геометрии и рост шероховатости. Восстановление поверхности пути возможно только с помощью шлифования поверхности рельсов. Также шлифование рельс выполняется и на новых путях для удаления обезуглероженного слоя, уменьшения заводских геометрических неровностей.

Наиболее перспективная методика шлифования рельсов выполняется рельсошлифовальным поездом РПШ-48К. Поезд состоит из скрепленных между собой четырех секций: одной тягово-энергетической и трех шлифующих. Восстановление геометрии сечения головки рельса и устранение волни-

стости происходит 48 шлифующими головками, по 24 на каждую сторону. Поезд ведет обработку со скоростью 4-8 км/час и снимает толщину поврежденного слоя до 0,3 мм. Шлифовальные головки, вращающиеся с частотой 3000 мин⁻¹ диаметром 250 мм, имеют привод мощностью 15 кВт.

Прогрессивными технологиями можно считать презентуемый холдингом «Синара – Транспортные Машины» инновационный рельсошлифовальный поезд 2.0. Скорость поезда со шлифованием рельсов составляет до 15 км/час, снимаемая толщина поврежденного слоя – до 0,2 мм. Выпуск поезда намечен на 2024 год. В этом случае используются шлифовальные головки, вращающиеся с частотой 5000 мин⁻¹. Повышение скорости обработки требует мощности привода 25 кВт. При повышенной мощности и частоте вращения применяется сложная разветвленная система охлаждения привода шлифовального круга. Нагрев происходит от электродвигателя и трения в подшипниках. В настоящее время существует запрос на повышение скорости обработки до 30 км/час и снимаемую толщину поврежденного слоя до 0,15 мм. Это, по предварительным расчетам, составит увеличение мощности не более чем до 40 кВт. Повысить скорость шлифования рельсов возможно при переходе на высокоскоростную обработку. Эффективность применения высокоскоростной обработки поясняется кривыми Соломона (рис. 1). Сила резания и температура при увеличении скорости резания сначала растут, потом начинают падать. Для шлифования абразивными инструментами закаленных сталей высокоскоростная обработка находится в пределах 100-2000 м/с. Применение таких скоростей резания позволяет значительно повысить подачу шлифовального круга, что в данном случае является скоростью движения поезда.

Шлифование при переходе на высокоскоростную обработку сталкивается со следующими проблемами: стойкость и прочность режущего инструмента, обеспечение поддержки опорных поверхностей вала, отвод тепла от электродвигателя и подшипников.

В настоящее время при шлифовальной обработке применяются шлифование со скоростью главного движения 50 м/с, однако все чаще для снижения температурного и силового воздействия применяют технологии со скоростями обработки более 100 м/с. Применяя в качестве материала для изготовления шлифовального круга кубический нитрид бора, скорость резания можно поднять до 250 м/с [2].

Также при повышении частоты вращения шлифовального круга необходимо рассмотреть возможность разрыва от центробежной силы. Предельная частота вращения шлифовальных кругов из электрокорунда, изготовленных методом горячего формования диаметром 250 мм, составляет 13 000 об./мин., что составит скорость обработки 170 м/с [2]. Сокращение диаметра шлифовального круга до 100 мм позволит повысить частоту вращения до 50 000 мин⁻¹. При этом значительно повысится запас прочности на разрыв шлифовального круга.

Множество работ по совершенствованию шлифования рельсов направлено на снижение износа шлифовального круга [3]. При этом отмечено, что износ напрямую зависит от силы резания. Снижение сил резания возможно повышением частоты вращения шлифовального круга, что происходит за счет уменьшения размеров удаляемых стружек единичным зерном. Повышением скорости резания с одновременным повышением интенсивности шлифования рельсов при тех же значениях сил резания можно достичь максимального увеличения производительности.

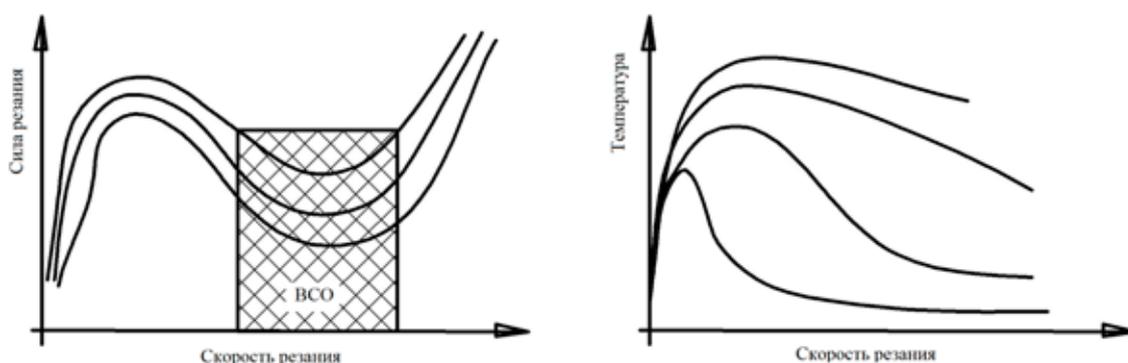


Рис. 1. Зависимость силы резания и температуры от скорости резания

Турбинный привод. Система водяного охлаждения, установленная в корпусе, мотор шпинделей, забирает тепловую энергию от потерь на трение при преобразовании электрической энергии в механическую, возникающих в основном в статоре двигателя. Автономная система охлаждения подводится к каждому из 48 приводов шлифовального круга, установленных на рельсошлифовальном поезде, и представляет собой сложную разветвленную систему. В качестве теплоносителя необходимо использовать воду с антикоррозионными присадками. Отвод тепла должен превышать мощность потерь и ориентировочно составляет не менее 0,2 от номинальной мощности электродвигателя [4].

Применение в этом случае в качестве привода электродвигателя с повышением частоты вращения и мощности невозможно. В качестве альтернативы предлагается использовать турбинный привод. Для этого на рельсошлифовальном поезде предлагается установить компрессор, приводящийся в движение от дизеля для производства сжатого воздуха. Мощность электрического генератора при этом снизится. Использование воздушной турбины для привода шлифовального круга – экологически чистая технология, так как в качестве рабочего тела используется воздух. Турбинный привод не требует охлаждения, поскольку воздух при расширении охлаждается и позволяет достичь любой частоты вращения.

Замену электродвигателя на турбинный привод необходимо производить с учетом увеличения мощности на привод рельсошлифовальной машинки. Была оценена возможность проектирования турбинного привода мощностью 40 кВт для привода шлифовального круга, и была спроектирована двухступенчатая осевая турбина со средним диаметром 70 мм и частотой вращения до 50 000 мин⁻¹. Регулирование расхода воздуха позволит изменять мощность и частоту вращения. Расход воздуха составил 0,67 кг/с на один привод. Для 48 приводов рельсошлифовального поезда расход воздуха составит 1400 м³/мин. с общей мощностью компрессора 2 МВт.

Подшипники. Ограничение скорости вращения обуславливается пределом быстроходности подшипников качения. Для высокоскоростного шлифования необходимо изменить тип опоры. Рассмотрим возможные предложения по замене. Во-первых, необходимо рассмотреть высокоскоростные керамические подшипники и подшипники, смазываемые масляным туманом. Однако керамические подшипники недостаточно прочные, а подшипники, сма-

зываемые масляным туманом, имеют сложную систему управления. При этом высокоскоростные подшипники качения очень дорогостоящие, имеют существенное ограничение по частоте вращения и значительные тепловыделения. Поэтому необходимо рассмотреть бесконтактные виды опор.

В высокоскоростных шлифовальных станках применяют жидкостные подшипники, такие подшипники имеют значительно меньшие сопротивления на трения и, как следствие, меньшие тепловыделения и работают на значительно больших частотах вращения. Разделение поверхностей трения при гидродинамической смазке происходит вследствие самопроизвольного образования давления в слое жидкости при относительном движении вала и подшипника. Гидродинамические подшипники имеют громоздкие системы смазки и охлаждения, а также требуют постоянного контроля за содержанием воды в масле, попадающей в систему смазки от жидкостного охлаждения. Недостаточность масляной пленки при пуске и требование экологической чистоты узлов трения заставляют отказываться от масляной смазки узлов трения.

В последнее время активно развиваются бесконтактные магнитные и газовые подшипники. Активные магнитные подвесы имеют сложную систему управления и применяются в основном для крупных энергетических роторных систем. Создание системы управления для большого числа привода шпинделя требует мощного вычислительного комплекса и не может реализоваться применительно к рельсошлифовальному поезду.

Рассмотрим возможность применения газовых опор в качестве подшипников шпинделя рельсошлифовального поезда. Газовые подшипники подразделяют на газостатические и газодинамические. В газодинамических смазка создается вращающимся ротором. Основной недостаток таких подшипников – низкая несущая способность до нескольких десятков на см², что явно недостаточно для поддержки шпинделя рельсошлифовальной машинки.

Газостатические опоры работают на основе давления, подаваемого в пространство между валом и подшипником, и давно нашли применение в механообработке [5]. На рисунке 2 приведено сравнение быстроходности подшипников качения и газостатических опор. Газостатические подшипники практически не имеют ограничения в скорости работы вследствие малости значения вязкости воздушного смазочного слоя. Проведем анализ возможности применения газостатических подшипников в качестве опор шпинделя рельсошлифовальной машинки.

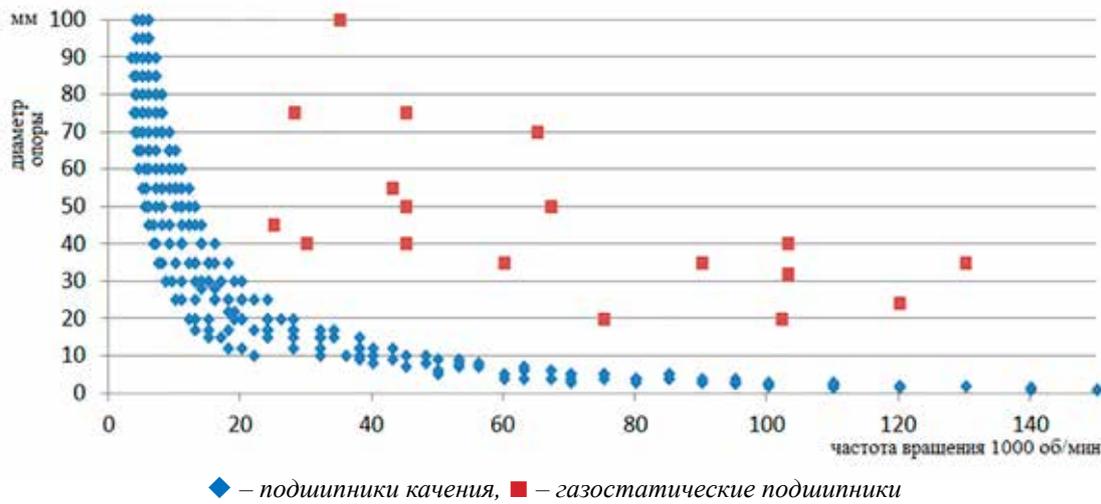


Рис. 2. Сравнение области применения подшипников качения и газостатических подшипников

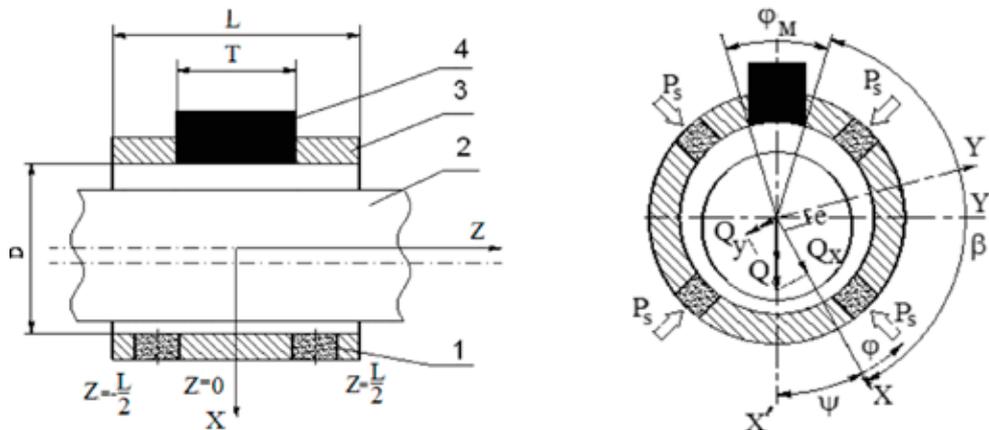


Рис. 3. Конструкция газомангнитной опоры:

1 – пористая цилиндрическая вставка; 2 – вал; 3 – непроницаемая втулка; 4 – электромагнит

Оценка эксплуатационных характеристик газостатических опор представлена в [6]. Характеристики получены с помощью численного интегрирования дифференциальных уравнений течения газовой смазки и физического эксперимента. В результате анализа эксплуатационных характеристик газостатических подшипников, представленных в [6], можно сделать вывод о том, что для поддержки шпинделя рельсошлифовальной машинки мощностью 40 кВт требуются значительные опорные поверхности. Для сокращения диаметров шпинделя и снижения его инерционности предлагается использовать разгружающую магнитную силу. Конструкция предлагаемого газомангнитного подшипника представлена на рисунке 3.

В зазор между шпинделем и подшипником через пористые вставки под давлением подается сжатый воздух. Частично-пори-

стые газостатические подшипники обеспечивают наилучшие эксплуатационные характеристики при минимальном расходе воздуха. Электромагнит создает дополнительное усилие за счет притяжения вала и обеспечивает компенсирующее усилие в направлении подачи или движения рельсошлифовального поезда, снижая главную составляющую силы резания. Несущая способность газомангнитной опоры определяется как результирующая двух векторов от магнитной силы и давления газовой смазки [6; 7].

Конструкция высокоскоростного шпиндельного узла. Шпиндельный узел опирается на переднюю газомангнитную опору и заднюю газостатическую. Шпиндель рельсошлифовальной машинки нагружен консольной силой от шлифовального круга. Газомангнитная опора требуется возле шлифовального круга. Силы реакции опоры на удалении от шлифовального круга

не столь значительные, и достаточно только газостатического подшипника (рис. 4).

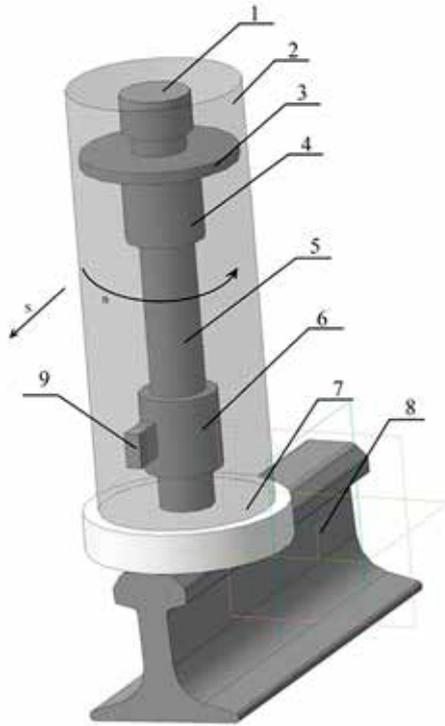


Рис. 4. Характеристика высокоскоростной рельсошлифовальной машинки:

- 1 – турбопривод, 2 – корпус, 3 – упорный подшипник (нагружающее устройство), 4 – задний газостатический подшипник, 5 – шпиндель, 6 – передний газомангнитный подшипник, 7 – шлифовальный круг, 8 – обрабатываемый рельс, 9 – магнит

Результаты исследования, выполненные в Комсомольском-на-Амуре университете, по проектированию шпиндельных узлов

с газомангнитными опорами могут быть полезны для применения в рельсошлифовальном поезде (рис. 5) [6; 7]. Результаты исследования представлены в относительных единицах и могут быть пересчитаны для более мощных шпиндельных узлов. Безразмерная характеристика относительная нагрузка (рис. 5а):

$$\bar{F} = \frac{F}{F_{max}} = \frac{F}{LD(p_s - p_a)},$$

где F – нагрузка на опору,

L – длина подшипника,

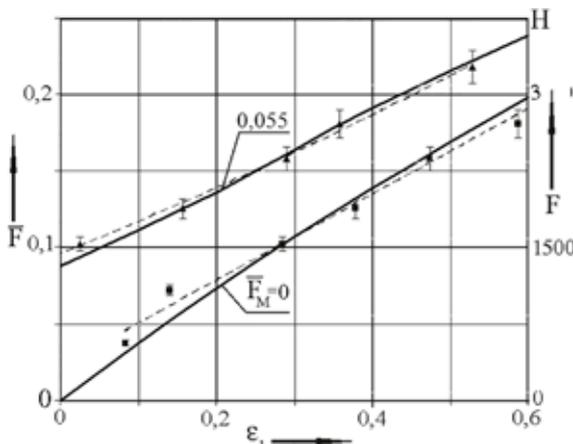
D – диаметр подшипника,

$p_s = 1,1 \text{ МПа}$ – давление наддува,

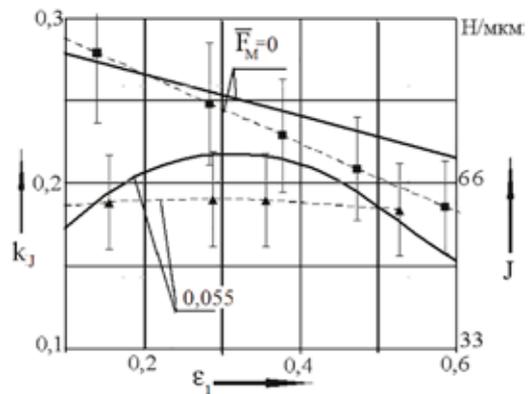
$p_a = 0,1 \text{ МПа}$ – давление на выходе из подшипника.

Имея соотношение $L / D = 1,3$, можно рассчитать требуемый диаметр из расчета максимальной нагрузки на опору $F = 3 \text{ кН}$ $D = 110 \text{ мм}$. Такая нагрузка необходима для удовлетворения прогрессивного запроса от «Синара – Транспортные Машины»: скорость обработки до 30 км/час и снимаемая толщина поврежденного слоя до 0,15 мм.

Внедрение магнитного управления снижает вибрацию ротора и тем самым значительно повышает качество обработки [8]. Важной эксплуатационной характеристикой подшипников является жесткость. Жесткость характеризует отклонение шпинделя от радиальной нагрузки. Колебание шпинделя определяет точность формы шлифуемого изделия. Исследование коэффициента жесткости у газомангнитных подшипников (рис. 5а) говорит о более высоких характеристиках жесткости по сравнению с подшипниками качения и, следовательно, о высоком качестве обрабатываемых рельсов.



а)



б)

Рис. 5. Зависимости относительной нагрузки \bar{F} (нагрузки F) от относительного эксцентриситета а) и коэффициента жесткости k_j (жесткости J) от относительного эксцентриситета б) ϵ_1 : - - - - теория; — — — опыт

Упорный подшипник может выполнять роль нагружающего устройства. Перед работой шпиндель рельсошлифовальной машинки разгоняют до требуемой частоты. В это время давление на нагружающий подпятник не подается, и шпиндель опирается на нижний подпятник. После разгона на подпятник подается давление, и шпиндель перемещается, вниз сдвигая слой подпятника, и опирается на рельсы, начиная его обрабатывать. Тем самым упрощается система управления нагрузкой шлифовальных машинок, убирая из поезда прецизионные подвижные элементы и упрощая тем самым конструкцию.

Упорный газостатический подшипник выполнен с питающими отверстиями. Расчет упорного газостатического подшипника выполнен из условия относительной нагрузки $\bar{F} = 0,2$ [6]. Требование увеличения производительности при сохранении силы резания [2] предполагает оставить имеющуюся нагружающую силу в 3 кН.

В статье представлена перспективная методика шлифования рельса высокоскоростной рельсошлифовальной машинкой, применение которой позволит сократить время простоя, повысив скорость обработки до 30 км/ч. Наиболее перспективным является использование турбинного привода, опирающегося на передний газомангнитный подшипник и задний газостатический подшипник. Нагружение шлифовального круга производится газостатическим подпятником. В ходе исследования была спроектирована принципиальная конструкция

рельсошлифовальной машинки с частотой вращения $50\ 000\ \text{мин}^{-1}$ и нагрузкой шлифовального круга 3 кН.

Список литературы

1. Рахчеев В.Г., Максимов И.С., Галанский С.А., Мустафин А.Г. Теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов при шлифовании // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 5(53). С. 65-69.
2. Ильных А.С. Создание абразивного инструмента для высокоскоростного шлифования // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. 3, № 2. С. 69-73.
3. Рахчеев В.Г., Максимов И.С., Галанский С.А., Мустафин А.Г. Анализ механизма износа абразивных кругов при шлифовании рельсов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 1(57). С. 68-75. DOI: 10.17084/20764359-2022-57-68.
4. Бушуев В.В., Молодцов В.В. Высокоскоростные мотор-шпиндели приводов главного движения металлорежущих станков // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 24-32.
5. Саблин П.А., Щетинин В.С. Повышение точности механообработки с помощью использования бесконтактных опор // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3(51). С. 104-106.
6. Космынин А.В., Щетинин В.С., Смирнов А.В., Хвостиков А.С. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Эксплуатация и проектирование. Москва – Вологда: ООО Издательство «Инфра-Инженерия», 2022. 372 с.
7. Шаламов Р.В., Щетинин В.С. Внедрение газомангнитных опор в компрессоры газоперекачивающих станций // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2017. Т. 1, № 3(31). С. 58-66.
8. Космынин А.В., Щетинин В.С., Саблин П.А. Обеспечение качества обработки материалов резанием посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 5(45). С. 115-118.