

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.835:620.17

doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТЯГОВЫХ ПЕРЕДАЧ ЛОКОМОТИВОВ И МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА (ОБЗОР)

Никита Владимирович Комаровский¹, Александр Генрикович Отока²✉

^{1,2} Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь

² Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги»

¹ nikgenat67@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-9890-0025>

² otokaa@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-9926-9439>

Аннотация

В статье наглядно демонстрируются отдельные испытания зубчатых колес и шестерен тяговых редукторов колесно-моторных блоков локомотивов и моторвагонного подвижного состава на соответствие государственным стандартам. Описывается процедура испытаний и методы контроля на соответствие механическим свойствам, твердости, качеству поверхности, микро- и макроструктуре. Рассматриваются особенности технологии магнитопо- рошкового и капиллярного методов неразрушаю-

щего контроля на предмет выявления трещин в зубчатых колесах и шестернях. Приводятся используемые средства измерений и испытательного оборудования, в том числе и вспомогательные материалы, используемые при дефектоскопии.

Ключевые слова: зубчатое колесо, шестерня, передача, испытание, свойства, вязкость, твердость, контроль, микроструктура, макроструктура, прочность.

Ссылка для цитирования:

Комаровский Н.В. Особенности проведения испытаний зубчатых колес тяговых передач локомотивов и моторвагонного подвижного состава (обзор) / Н.В. Комаровский, А.Г. Отока // Транспортное машиностроение. – 2024. – №9. – С. 27-37. doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37.

Original article

Open Access Article

FEATURES OF TESTING COGGED WHEELS OF TRACTION GEARS OF LOCOMOTIVES AND MULTIPLE ROLLING STOCK (REVIEW)

Nikita Vladimirovich Komarovsky¹, Aleksandr Henrikovich Otoka²✉

^{1,2} Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

² Gomel Car House Gomel Branch of Belarusian Railway

¹ nikgenat67@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-9890-0025>

² otokaa@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-9926-9439>

Abstract

The paper clearly shows some tests of cogged wheels and gears of traction gearboxes of locomotive wheel-motor units and multiple rolling stock for compliance with state standards. The test procedure and control methods for compliance with mechanical properties, hardness, surface quality, micro- and macro-structure are described. The features of magnetic pow-

der technology and capillary non-destructive testing methods for detecting cracks in cogged wheels and bearings are considered. The measuring tools and test equipment, including auxiliary materials used in flaw detection, are given.

Keywords: cogged wheel, gear, transmission, testing, properties, viscosity, hardness, control, micro-

structure, macrostructure, strength.

Reference for citing:

Komarovsky NV, Otoka AG. Features of testing cogged wheels of traction gears of locomotives and multiple rolling stock (review). Transport Engineering. 2024;9: 27-37. doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37.

Введение

Тяговый привод является одним из тяжело нагруженных узлов локомотивов и моторвагонного подвижного состава, где зубья шестерней и зубчатых колес в процессе эксплуатации подвергаются изгибным и контактным напряжениям [1].

В области зацепления ведущей шестерни и ведомого зубчатого колеса действуют контактные силы, которые формируются в основном за счет крутящего момента и от импульсного воздействия при прохождении стыковых неровностей рельсов [2].

К тяговому приводу в технической литературе относятся устройства для передачи и преобразования энергии от первичного двигателя или сети энергоснабжения, контактной или бесконтактной, к путевой инфраструктуре, для создания тягового усилия, приводящего в движение железнодорожное транспортное средство, а также системы управления этими устройствами. Тяговый привод работает в условиях сложной комбинации разнообразных воздействий (периодические нагрузки, удары, автоколебания, наличие внешних и внутренних возбуждающих факторов) [5]. Поэтому на сегодняшний день, в частности в работах [6-9] активно ведутся исследования и поиск путей повышения тяговых свойств и конструкций тяговых приводов, позволяющих в том числе повысить эффективность и долговечность зубчатых передач.

Стоит отметить, что особое внимание уделяется расчетным значениям напряженно-деформированного состояния зубьев цилиндрических передач.

В работах [10-13] рассматриваются динамические характеристики тягового двигателя и зубчатых передач высокоскоростных поездов. Сравниваются результаты моделирования с результатами экспериментальных полевых испытаний с учетом нелинейных факторов, таких как не-

линейные характеристики демпфирования, изменяющаяся во времени жесткость зацепления зубчатых колес и зависимость контакта колеса с рельсом.

В работах [14-15] приведены конечно-элементные анализы напряженно-деформированного состояния зубьев передач при различных нагрузках, а также износ зубчатых колес в эксплуатации в программных комплексах *ANSYS*, *SOLID92* и др.

К основным характеристикам шестерней и зубчатых колес можно отнести химический состав стали, механические свойства материала колес, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость, шероховатость поверхности зубьев, показатели упрочненного слоя, макро- и микроструктура, а также изгибная усталостная прочность зубьев колес. На основании требований нормативной документации ведутся работы по разработке различных методик испытаний, позволяющих оценить качество изготовления зубчатых колес.

К примеру, в работе [16] разработаны специальные опорные и нагрузочные приспособления для испытаний изгибной усталостной прочности зубьев. Разработана методика для экспериментальной оценки качества изготовления зубчатых колес и подтверждения их соответствия требованиям [4] и требованиям Технического регламента таможенного союза.

В работе [17] разработан метод ускоренных стендовых испытаний зубчатых приводных механизмов при минимальном количестве испытываемых образцов. Такой подход позволяет оценить соответствие расчетного ресурса трансмиссионного узла фактическому эксплуатационному по результатам испытаний одного образца, что в целом снижает трудозатраты и мате-

риальные расходы при отборе большого количества объектов испытаний.

Известно, что наиболее опасными неисправностями в тяговых передачах являются изломы и деформации зубьев шестерни и колеса. Чаще всего изломы появляются из-за усталостных трещин, которые развиваются от поверхности фасок зуба, межзубцовых впадин и связаны они с производственными дефектами. Дефекты могут возникать при отклонениях в процессах механической, термической и химико-термической обработки [3].



Рис. 1. Упрочнение зубьев зубчатого колеса токами высокой частоты (ТВЧ) с помощью универсального закалочного станка
Fig. 1. Hardening of the gear wheel teeth by high frequency currents (HFC) using the universal quenching machine

После закалки зубьев зубчатых колес их твердость, как правило, возрастает примерно в 1,7...2,1 раза в сравнении с результатами до упрочнения.

Механические свойства определяют по темплетам – образцам, вырезанным из испытуемого зубчатого колеса по государственному стандарту [18]. При этом заготовка должна пройти обязательную термическую обработку.

На рис. 2 показаны проводимые испытания на статическое растяжение.

По результатам испытания на статическое растяжение определяют предел текучести σ , относительное удлинение δ , относительное сужение ψ и другие характеристики материалов изготовления изделий.

На рис. 3 показаны проводимые испытания на ударный изгиб.

Поэтому долговечность и качество зубчатых передач определяются через контроль зубчатых колес и шестерен на соответствие требованиям государственного стандарта [4] при прямо-сдаточных, периодических, типовых испытаниях и испытаниях для обязательного подтверждения соответствия.

К важным измеряемым характеристикам относят механические свойства материала после упрочнения слоя зубчатых колес и шестерен цементацией или токами высокой частоты (рис. 1).

Контроль для изгибной усталости прочности зубьев колес проводят на базе $4 \cdot 10^6$ циклов испытаний.

Схема испытаний предполагает установку образца, вырезанного из объекта контроля, на плиту испытательного стенда, и жесткое крепление его с помощью прихватов (рис. 4). В течение всего времени испытания образец находится в неподвижном состоянии. Испытание выполняется повторно-переменным нагружением ролика, установленного между зубьями образца.

Согласно государственному стандарту [19] частота нагружения при испытаниях должна соответствовать эксплуатационной частоте (по возможности). Малые частоты (менее 1 Гц) по сравнению с обычными испытательными частотами (от 10 до 300 Гц) дают числа циклов до раз-

рушения в 1,5...2,5 раза меньше, а предел выносливости – на 10...20 % меньше. Высокие частоты (более 300 Гц) приводят при

охлаждении детали к повышению предела выносливости, а при отсутствии охлаждения – к его снижению.

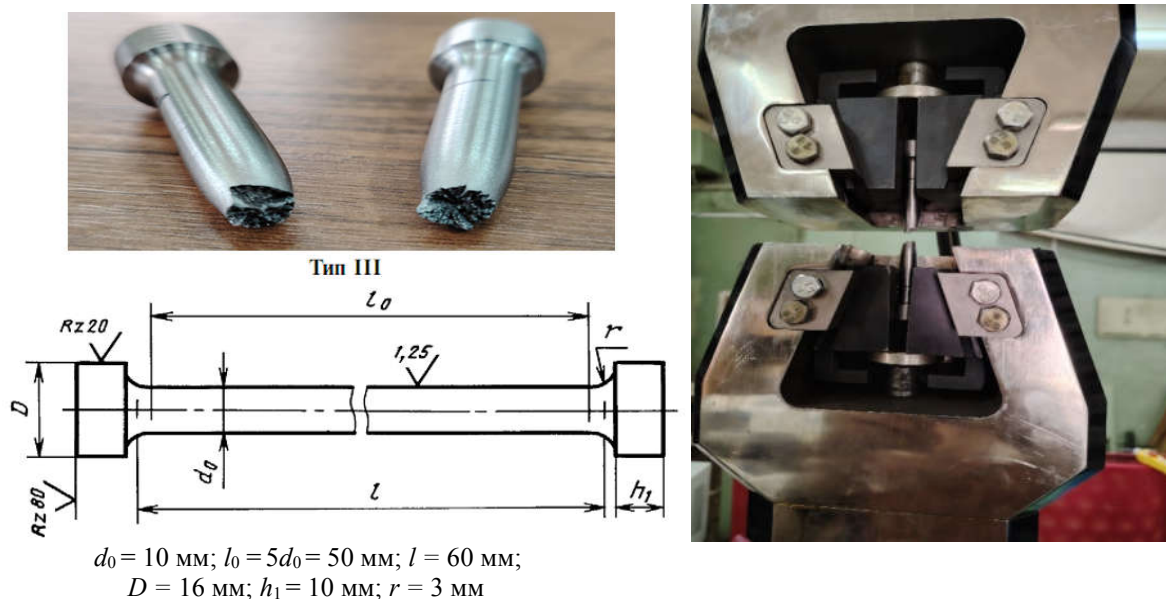


Рис. 2. Испытание на статическое растяжение темплета с использованием разрывной машины TIME WDW-300 E
 Fig. 2. Static stretching test of a templet using a TIME WDW-300 E bursting machine

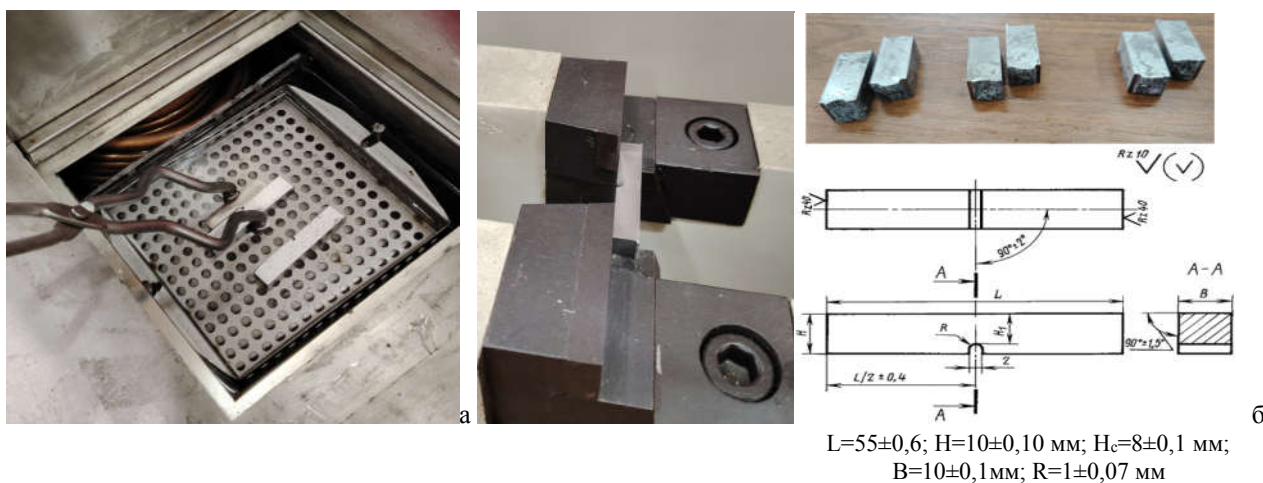


Рис. 3. Процесс (а) охлаждения образцов с помощью низкотемпературной камеры и испытание (б) темплета на ударный изгиб с помощью маятникового копера Kason JBW-300
 Fig. 3. The process (a) of cooling samples using a low-temperature chamber and testing the templet for impact bending using a Kason JBW-300 pendulum copper

Следует подчеркнуть, что испытания должны включать в себя восемь ступеней нагружения, которые соответствуют различным режимам эксплуатации зубчатого колеса.

В ходе испытания также контролируют изменение температуры при помощи бесконтактного термометра, а после испытания осматривают образец на признаки

появления трещин в области переходной кривой и в целом разрушения зубьев.

Контроль качества микроструктуры проводят на поперечных полированных темплетах. Для колес и шестерен, упрочненных ТВЧ, контроль качества микроструктуры проводят по продольному темpletу.

Для выявления толщины и конфигурации упрочненного слоя темплеты со

шлифованной поверхностью протравливают 30-35 %-м водным раствором азотной кислоты (рис. 5).

Оценку проводят путем сопоставления выявленной структуры с эталонами 1–10 шкалы 1 по государственному стандарту [20] в соответствии с приложением А, рис. А.1–А.10.

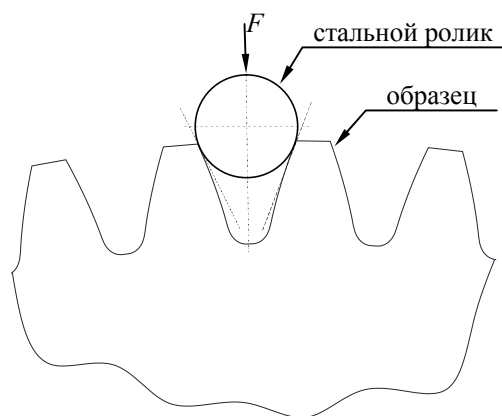


Рис. 4. Циклические испытания фрагмента шестерни на изгибную усталость при помощи универсальной разрывной машины ТС244.31А

Fig. 4. Cyclic testing of a gear fragment for bending fatigue using a universal breaking machine TS244.31A



(до травления)



(после травления)

Рис. 5. Результаты травления азотной кислотой темплета шестерни (контроль конфигурации и толщины цементованного слоя)

Fig. 5. Results of nitric acid etching of the gear template (control of the configuration and thickness of the cemented layer)

Оценка микроструктуры упрочненного слоя проводится на полированных поперечных темплетах после травления 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте при увеличении 100× и 500× (рис. 6), путем сопоставления выявленной структуры с эталонами 1–7 шкалы 2 приложения Б по государственному стандарту [20].

Твердость основного металла (сердцевины зуба) определяется на двух поперечных темплетах на уровне впадины посередине толщины зуба (по три зуба на

каждом темпете) методом Роквелла по шкале С по государственному стандарту [21].

Среднее значение твердости по Роквеллу переводится в значение твердости по шкале Бринелля в соответствии с марочником сталей и сплавов [22].

Допускается измерения твердости проводить методом Виккерса по государственному стандарту [23].

Контроль твердости упрочненного слоя проводится методом Роквелла по государственному стандарту [21].

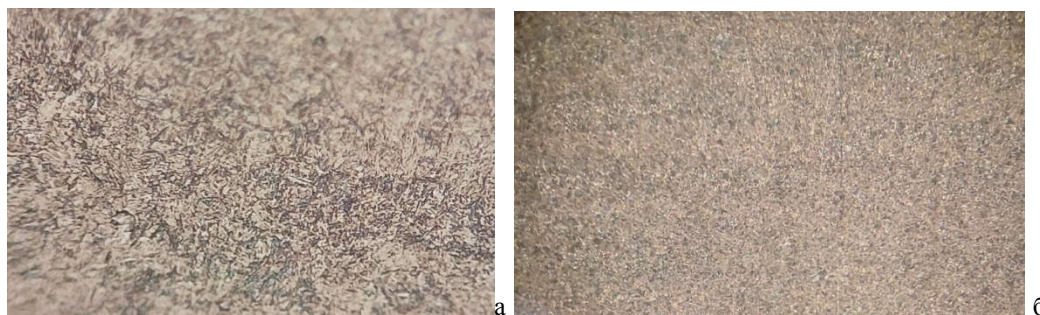


Рис. 6. Пример полученных результатов микроструктуры зубчатого колеса упрочненного слоя (а) при увеличении 500 \times и сердцевины (б) при увеличении 100 \times с использованием тринокулярного микроскопа BS-6030
Fig. 6. An example of the obtained results of the gear wheel hardened layer (a) at 500 \times magnification and the core (b) microstructure the at 100 \times magnification using a BS-6030 trinocular microscope

Соответствие параметров шероховатости поверхностей зубьев проверяют на каждом колесе и шестерне путем сличения с эталонным колесом, образцами шероховатости или применяют профилометр.

Поверхность зубчатых колес и шестерен осматривают визуально или химическим способом в соответствии с НТД предприятия-изготовителя на наличие прижогов.

Наличие трещин выявляют, как правило, магнитопорошковым методом контроля. Однако допускается и применение других методов, сопоставимых по выявляемым размерам дефектов. Например, магнитопорошковый контроль часто сравнивают по чувствительности с капиллярным.

Магнитопорошковый контроль основан на выявлении магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектом. Зубчатое колесо намагничивают и наносят суспензию. Технология нанесения магнитного индикатора на поверхность колеса также может отличаться в зависимости от проверяемых объемов, имеющегося вспомогательного инвентаря, применяемого способа намагничивания и др. причин.

В локомотивном хозяйстве пользуется популярностью нанесение магнитной суспензии на объект контроля путем полива и распыления из пульверизатора. Так как контроль проводится в цеховых условиях и при больших объемах контролируемых изделий магнитную суспензию приготавливают самостоятельно в соответствии с паспортом. В качестве дисперсионной среды используют техническую во-

ду или масло в определенной пропорции с керосином. Пользуется популярностью цветные магнитные индикаторы: «Диагма-1100» (черный), «Диагма-1200» (коричневый) и люминесцентные «Mi-Glow850» (красный), «КСФ-12» (зеленый), «Диагма-1613» (зеленый) и др.

Магнитопорошковый контроль поверхности зубьев и межзубных впадин, а также торцевой части венца шестерни и зубчатого колеса проводят способом остаточной намагниченности (рис. 7).

Проверка работоспособности магнитной суспензии и намагничивающего устройства проводят при помощи настроечного образца НО МП 32.06 в виде фрагмента зубчатого колеса с двумя искусственными дефектами, выполненными в виде вставки вдоль межзубных впадин (рис. 8).

В локомотивных и моторвагонных депо магнитопорошковой дефектоскопии подвергается только венец зубчатого колеса. При этом, в соответствии с государственным стандартом [3] не допускаются трещины на всех обработанных поверхностях зубчатого колеса т.е. подразумевается проведение магнитопорошкового контроля диска и ступицы колеса, включая все переходы от диска к ступице и от диска к ободу. Поэтому ввиду того, что зубчатые колеса изготавливают из магнитотвердой стали 45ХН, которая достаточно тяжело намагничивается (коэрцитивная сила H_c растет с увеличением содержания углерода в стали), проведение магнитопорошкового контроля способом приложенного поля с

помощью электромагнита на практике весьма трудоемкий процесс (рис. 9а).

В связи с этим, предпочтение отдают капиллярному контролю (рис. 9б) с использованием дефектоскопического набо-

ра в виде пенетранта, очистителя и проявителя пенетранта. Пользуется популярностью набор из трех баллонов *MR68C* (пенетрант), *MR88* (очиститель), *MR70* (проявитель).



Рис. 7. Намагничивание венца зубчатого колеса (а) и шестерни (б) с помощью индуктора дефектоскопом УМДЗ

Fig. 7. Magnetization of a gear wheel (a) and a gear (b) using an inductor with a flaw detector



Рис. 8. Проверка работоспособности магнитопорошкового дефектоскопа и магнитного индикатора:

а – до намагничивания и нанесения магнитной суспензии;

б – после проведения магнитопорошкового контроля

Fig. 8. Checking the operability of the magnetic particle flaw detector and magnetic indicator:

a – before magnetization and application of magnetic suspension;

b – after magnetic powder inspection

Капиллярный контроль – это метод выявления поверхностных и сквозных несплошностей материала объекта контроля. Он основан на капиллярном проникновении в них индикаторной жидкости – пенетранта и регистрации образующихся индикаторных рисунков, полученных, как правило, в результате последующего полного или частичного извлечения жидкости на поверхность, опико-визуальным способом.

Нанесение на контролируемую поверхность смачивающего пенетранта при-

водит к его проникновению в глубь несплошностей. После установленного промежутка времени пенетрант удаляется с контролируемой поверхности объекта (или гасится на ней соответствующим составом) и остается только в полостях несплошностей, если таковые имеются. При последующем нанесении на контролируемую поверхность проявителя пенетрант впитывается в него из несплошностей, в результате чего могут образовываться визуализируемые индикаторные рисунки поверхностных несплошностей [24].



Рис. 9. Неразрушающий контроль диска зубчатого колеса магнитопорошковым (а) и капиллярным (б) методами
 Fig. 9. Non-destructive testing of the gear disk by magnetic powder (a) and capillary (b) methods

Заключение

В заключении хотелось подчеркнуть, что такие испытания имеют важнейшее значение в железнодорожной отрасли, так как на основе полученных результатов делаются прогнозы относительно будущей эксплуатационной работы зубчатых колес и шестерен тяговых передач локомотивов и моторвагонного подвижного состава.

Сравнивая результаты механических, химических и других испытаний с установленными нормами государственных стандартов на выходе получаем представление о качестве выпускаемой продукции, от которой напрямую зависит безопасность движения поездов, грузов и пассажиров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров И.В. Метод ускоренной экспериментальной оценки изгибной усталостной прочности зубьев колес и шестерен подвижного состава / И.В. Федоров, В.А. Белгородцев и [др.] // Известия ПГУПС. №4. 2016. С. 553-560.
2. Кузнецов В.Ф. Контактные напряжения в зубчатых колесах тягового редуктора колесно-моторного блока электровоза / В.Ф. Кузнецов, С.Г. Шантаренко и [др.] // Известия Транссиба. №3(7). 2011. С. 24-29.
3. Морозова Л.В. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации / Л.В. Морозова, М.Р. Орлов // Авиационные материалы и технологии. №S1. 2015. С. 37-48.
4. ГОСТ 30803-2014 Колеса зубчатые тяговых передач тягового подвижного состава. Москва. 2015. 13 с.

5. Применение классификаций для поиска новых технических решений : монография / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин и [др.]: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева. – Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2022. – 189 с.
6. Космодамианский А.С. Методы поиска оптимальных параметров динамической системы тягового привода в процессе выбора вариантов конструкции // А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев и [др.] // Известия Транссиба. №2(38). Омск. 2019. С. 90-100.
7. Павленко В.А. Разработка математической модели тягового привода для исследования напряженного состояния кожуха зубчатой передачи / В.А. Павленко, Е.К. Рыбников // Инновации и инвестиции. №2.2019. С.170 -174.
8. Веселовский А.А. Исследование износостойкости чугунных зубчатых колес с термодиффузионными карбидными покрытиями // Вестник УГСА, №3(51). 2020. – С. 28 – 32. doi: 10.18286/1816-4501-2020-3-28-32.
9. Antoshchenkov, R., Bogdanovich, S., Halych, I., Cherevatenko, H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (7 (121)), 2023. P. 40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>.
10. Z. Wang, R. Wang, D. Crosbee, P. Allen, Y. Ye, W. Zhang Wheel wear analysis of motor and unpowered car of a high-speed train, *Wear*. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203136>.
11. T. Zhang, T. Jin et al. Dynamic modeling of a metro vehicle considering the motor-gearbox transmission system under traction conditions / *Mech. Sci.*, №13. 2022. P. 603–617. doi: <https://doi.org/10.5194/ms-13-603-2022>.
12. Z. Wang, G. Mei and Q. Xiong et al. Motor car-track spatial coupled dynamics model of a high-speed train with traction transmission systems // *Mechanism and Machine Theory*, №137, 2019. P. 386-403.
13. Z. Zhou, Z. Chen et al. Dynamic performance of locomotive electric drive system under excitation from gear transmission and wheel-rail interaction // *Vehicle System Dynamics*. P. 1–23. doi: 10.1080/00423114.2021.1876887.
14. Сызранцева К.В. Сопоставительная оценка расчетных и экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии арочных зубьев колес цилиндрических передач / К.В. Сызранцева, Д.С. Колбасин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. Т. 24, №1. 2021. С. 45–52. doi: 10.22213/2413-1172-2021-1-45-52.
15. Z. Wang, Y. Cheng et al. Torsion vibration analysis of the gear transmission system of high-speed trains with wheel defects / *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit* 0(0), 2019. P.1–11. doi: 10.1177/09544097 || 9833791 journals.sagepub.com/home/pif.
16. Сорокина Е.В. Испытания колес зубчатых цилиндрических тяговых передач железнодорожного подвижного состава / Е.В. Сорокина, А.А. Хоменко и [др.] // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: сборник науч. Трудов VIII Всероссийской науч.-техн. конференции, Брянск. 2019. С. 173-175.
17. Ишин Н.Н. Метод проведения ускоренных стендовых испытаний зубчатых приводных механизмов при минимальном количестве испытываемых образцов / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман и [др.] // Актуальные вопросы машиноведения, Вып. 9. 2020. С. 234-237.
18. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение, Москва. 2008. 22 с.
19. ГОСТ 25.507-85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования. 19 с.
20. ГОСТ 33189-2014 Колеса зубчатые тяговых передач тягового подвижного состава. Шкала эталонов макро- и микроструктур, Москва. 2019. 24 с.
21. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу, Москва. 8 с
22. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко и [др.]: 2-е издание доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
23. ГОСТ 2999-75 (СТ СЭВ 470-77). Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. Москва. 30 с.
24. Отока А.Г., Шлапак П.С. Опыт использования магнитопорошкового и капиллярного методов контроля при обнаружении дефектов в объектах контролятнефтяной промышленности // *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. №8(2). 2023. С. 149-156. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-2-149-156>.

REFERENCES

1. Fedorov IV, Belgorodtsev VA. Method of accelerated experimental evaluation of flexural fatigue strength in wheels and gears of rolling stock. and gears *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2016;4:553-560.
2. Kuznetsov VF, Shantarenko SG. Contact stresses in the gears of the traction gearbox of an electric locomotive wheel-motor block. *Izvestia Transsiba*. 2011;3(7): 24-29.
3. Morozova LV, Orlov MR. Study of the causes of gear destruction during operation. *Aviation Materials and Technologies*. 2015;S1:37-48.
4. GOST 30803-2014 Transmission tooth gears of the traction railway stock. Moscow: Standartinform; 2015.

5. Vorobyov VI, Zlobin SN. Application of classifications for the search for new technical solutions: monograph. Orel: OSU; 2022.
6. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI. Methods of searching for optimal parameters of a dynamic traction drive system while choosing design options. *Izvestia Transsiba*. 2019;2(38):90-100.
7. Pavlenko VA, Rybnikov EK. Development of pulling drive computer model for stress state analysis of gear casing. *Innovation and Investment*. 2019;2:170-174.
8. Veselovsky AA. Research of wear resistance of iron gear wheels with diffuse carbide layer. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2020;3(51):28 – 32. doi: 10.18286/1816-4501-2020-3-28-32.
9. Antoshchenkov R, Bogdanovich S, Halych I, Cherevatenko H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023;1(7(121)):40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>.
10. Wang Z, Wang R, Crosbee D, Allen P, Ye Y, Zhang W. Wheel wear analysis of motor and unpowered car of a high-speed train, *Wear*; 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203136>.
11. Zhang T, Jin T. Dynamic modeling of a metro vehicle considering the motor-gearbox transmission system under traction conditions / *Mech. Sci*. 2022;13:603–617. doi: <https://doi.org/10.5194/ms-13-603-2022>.
12. Wang Z, Mei G, Xiong Q. Motor car–track spatial coupled dynamics model of a high-speed train with traction transmission systems. *Mechanism and Machine Theory*. 2019;137:386-403.
13. Zhou Z, Chen Z. Dynamic performance of locomotive electric drive system under excitation from gear transmission and wheel-rail interaction. *Vehicle System Dynamics*. 2021;60(4):1–23. doi: 10.1080/00423114.2021.1876887.
14. Syzrantseva KV, Kolbasin DS. Comparative evaluation of calculated and experimental data on the stress-strain state of cylindrical gearwheel arc teeth. *Bulletin of IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021;24(1):45-52. doi: 10.22213/2413-1172-2021-1-45-52.
15. Wang Z, Cheng Y. Torsion vibration analysis of the gear transmission system of high-speed trains with wheel defects. *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit* 0(0), 2019:0(0):1–11. doi: 10.1177/09544097 || 983379I journals.sagepub.com/home/pif.
16. Sorokina EV, Khomenko AA. Tests of wheels of cylindrical traction gears of rolling stock. *Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference, 2019: Problems and Prospects of Car Building Development*. Bryansk; 2019.
17. Ishin NN, Homan AM. Method of conducting accelerated bench tests of gear drive mechanisms with a minimum number of tested samples. *Actual Issues of Machine Science*. 2020;9:234-237.
18. GOST 1497-84 Metals. Methods of tension test. Moscow: Standartinform; 2008.
19. GOST 25.507-85 Strength calculations and testing in machine building. Methods of fatigue testing under service loading. General requirements.
20. GOST 33189-2014 Transmission tooth gears of the traction main railway stock. Scale of macro- and microstructure standards. Moscow: Standartinform; 2019.
21. GOST 9013-59 (ISO 6508-86). Metals. Method of measuring Rockwell hardness. Moscow; 2001.
22. Zubchenko AS. Guide of steels and alloys. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie; 2003.
23. GOST 2999-75 (ST SEV 470-77). Metals and alloys. Vickers hardness treat by diamond pyramid. Moscow; 1986.
24. Otoka AG, Shlapak PS. Experience of using magnetic powder and capillary methods of nondestructive testing in detecting defects of control objects in the oil industry [Internet]. PRONEFT. Professionally about Oil. 2023;8(2):149-156. Available from: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-2-149-156>.

Информация об авторах:

Комаровский Никита Владимирович – инженер испытательного центра железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТа), аспирант кафедры «Техническая физика и теоретическая механика», тел. +375333113062, AuthorID: 1191312.

Komarovsky Nikita Vladimirovich – Engineer of the Railway Transport Testing Center at Belarusian State University of Transport, Postgraduate Student of the Department of Technical Physics and Theoretical Mechanics; phone: +375333113062, AuthorID: 1191312.

Отока Александр Генрикович – инженер-технолог Гомельского вагонного депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги»; инженер испытательного центра железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТа), аспирант кафедры «Вагоны», тел. +375336163548, AuthorID: 1220168.

Otoka Aleksandr Henrikovich – Process Engineer of Gomel Car House *Gomel Branch of Belarusian Railway*; Engineer of the Railway Transport Test Center at Belarusian State University of Transport, Postgraduate Student of the Department of Cars; phone: +375336163548, AuthorID: 1220168.

**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 19.07.2024; одобрена после рецензирования 25.07.2024; принята к публикации 26.08.2024. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 19.07.2024; approved after review on 25.07.2024; accepted for publication on 26.08.2024. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.