

АНАЛИЗ И УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

В. И. Плеханов, Н. Ф. Коленчин, В. В. Китаев
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE CAUSES OF THE HEAVILY LOADED GEARS FAILURE

Vladimir I. Plehanov, Nikolay F. Kolenchin, Vladimir V. Kitaev
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Разрушение зубчатых колес происходит по различным причинам, связанным, прежде всего, с нарушением на разных этапах технологии их изготовления, некачественным монтажом зубчатой передачи или механизма в целом, а также превышением заданных эксплуатационных нагрузок. Целью исследования является установление причин разрушения шестерен верхнего привода буровой установки на основе механических и структурных характеристик, полученных общепринятыми методами, совокупно применяемыми для оценки природы возникающих повреждений. Для анализа соответствия качества изготовления шестерен эксплуатационным требованиям и выявления причины выхода их из строя были проведены комплексные исследования, включающие микроструктурный анализ металла шестерен, определение его химического состава и механических свойств, а также исследование морфологии поверхности

Abstract. The destruction of gears occurs due to various reasons, first, connected with violation of manufacturing technology at different stages, poor quality assembly of the gear or the whole mechanism, as well as exceeding the specified operating loads. The aim of the study was to establish the causes of failure of the top drive gears in the drilling rig based on the mechanical and structural characteristics obtained by generally accepted methods, collectively used to assess the nature of the resulting damage. In order to analyze the compliance of the gear manufacturing quality with the operational requirements and to identify the cause of their failure, we carried out complex studies, including microstructural analysis of the gear metal, determination of its chemical composition and mechanical properties, as well as the study of the fracture surface morphology using scanning electron microscopy. As a result, we

разрушения с помощью растровой электронной микроскопии. В результате было определено, что зубчатые колеса вышли из строя по причине нарушения технологии их изготовления в части неправильно проведенной термической обработки.

Ключевые слова: разрушение шестерен, зубчатая передача, термообработка зубчатых колес, изнашивание зубчатых передач, буровая установка, верхний привод

Для цитирования: Плеханов, В. И. Анализ и установление причин разрушения тяжело нагруженных зубчатых передач / В. И. Плеханов, Н. Ф. Коленчин, В. В. Китаев. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-106-115. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1 (107). – С. 106–115.

For citation: Plehanov, V. I., Kolenchin, N. F., & Kitaev, V. V. (2024). Analysis and determination of the causes of the heavily loaded gears failure. Architecture, Construction, Transport, (1(107)), pp. 106-115. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-106-115.

1. Введение

В процессе эксплуатации зубчатые колеса выходят из строя по причинам, связанным: либо с нарушением технологии их производства, либо в результате нарушений требований монтажа зубчатых передач и механизма в целом, либо по причине превышения заданных эксплуатационных нагрузок [1]. В силовых агрегатах, работающих в тяжелых условиях, зубчатые колеса подвергаются более высоким окружным скоростям и изгибающим циклическим нагрузкам, а также контактными воздействиями, что в совокупности должно учитываться при предъявлении требований как к материалу для изготовления зубчатых элементов, так и к технологии их изготовления. При нарушении данных требований разрушение может проходить двумя способами – в виде интенсивного изнашивания по поверхности контакта или поломки зуба [2, 3].

На величину и интенсивность изнашивания зубьев влияет неполное сцепление по поверхности контакта (пятну контакта), которое может быть вызвано некачественным монтажом (несоблюдением радиального зазора).

Постепенное изнашивание в результате повышенного трения связано с различными требо-

found that the gears failed due to a violation of the manufacturing technology in terms of wrong heat treatment.

Key words: gear destruction, gear transmission, gear heat treatment, gear wear, gear train wear, drilling rig, top drive

ваниями, предъявляемыми к зубчатым элементам на основании технической документации. К ним относятся твердость материала, из которого изготовлены шестерни, режимы термообработки, правильность подбора смазки, чистота масла и своевременность его смены и т. п. [4].

Поломка зубьев может происходить в результате перегрузки зубчатой передачи, односторонней нагрузки на один конец венца зуба, подреза зуба, наличия трещин в материале заготовки или появления микротрещин в результате некачественно проведенной термической обработки, недостаточной сопротивляемости металла ударным нагрузкам, попадания в зубчатую передачу твердых предметов и т. д.

Соблюдение правильности монтажа, своевременный надзор за элементами механизма в процессе эксплуатации являются основными условиями продолжительной и бесперебойной работы оборудования [5, 6].

2. Материалы и методы

Объектами исследования являлись два поврежденных зубчатых колеса редуктора системы верхнего привода производства корпорации TESCO (TESCO 250 EMI400) буровой установки,

эксплуатировавшейся на одном из нефтяных месторождений Тюменской области. С целью установления соответствия качества изготовления деталей требованиям технических условий (чертежа) предприятия-заказчика в 2023 г. было проведено исследование, включающее: внешний визуальный осмотр (СТО 9701105632-003-2021¹); химический анализ металла на спектроанализаторе Belek Compact Lab – N (Belec Spektrometrie opto-elektronik GmbH, Германия) в соответствии с ГОСТ 8895-97²; металлографические исследования в лабораторных условиях на микроскопе Carl Zeiss. Neophot-32 (Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Германия) в соответствии с ГОСТ 8233-56³; фрактографические исследования поверхности разрушения растровым электронным микроскопом JEOL JSM-6510A (JEOL, Япония) и измерение твердости поврежденных деталей по методу Виккерса твердомером ИТ5010 («Техмаш», Россия) в соответствии с ГОСТ 2999-75⁴, а для более детального измерения различных участков цементованного слоя – микротвердомером ПМТ-3М («Восток – 7», Россия) в соответствии с ГОСТ 9450-76⁵.

По данным изготовителя оборудования, представленные детали должны быть выполнены из стали AISI/SAE 8620-H, а поверхность зубчатого венца подвергнута цементации с последующей упрочняющей термообработкой для достижения в цементованном слое твердости 58-60 HRC.

Общие сведения о представленных деталях и принятые в данной работе условные обозначения приведены в таблице 1.

Таблица 1/Table 1
Общие сведения о представленных деталях
и их условные обозначения
General information about the studied parts
and their symbols

Условное обозначение	Описание детали согласно спецификации
Шестерня 1	Pinion, Input Helical Mk2, EMI 400 (Part No. 1410089 Rev1) Серийный номер: MFGC147311-3-1410089-1
Шестерня 2	Gear, Intermediate Helical Mk2, EMI 400 (Part No. 1410085 Rev1) Серийный номер: отсутствует

¹ Инструкция по визуальному и измерительному контролю : СТО 9701105632-003-2021 : разработана и утверждена ООО «Сварка и контроль» : введена 26.03.2021. – Текст : электронный // svarikon.ru : сайт. – URL: https://svarikon.ru/2021/03/sto_9701105632-003-2021/ (дата обращения: 02.12.2023).

² ГОСТ 8895-97. Межгосударственный стандарт. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа = Steel. Method of photoelectric spectral analysis : разработан Российской Федерацией, Межгосударственным техническим комитетом МТК 145 «Методы контроля металлопродукции» : внесен Госстандартом России : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 11-97 от 25 апреля 1997 г.) : введен 1998-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005201?ysclid=lqgfpwuzut973756690> (дата обращения: 02.12.2023).

³ ГОСТ 8233-56. Межгосударственный стандарт. Сталь. Эталоны микроструктуры = Steel. Microstructure standards : утвержден Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров Союза ССР 26/XI 1956 г. : введен 1957-01-07. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004654?ysclid=lqghbxh99v983326902> (дата обращения: 02.12.2023).

⁴ ГОСТ 2999-75. Государственный стандарт Союза ССР. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу = Metals and alloys. Vickers hardness test by diamond pyramid : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 июля 1975 г. № 1956 : введен 1976-07-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004651?ysclid=lqghxjffoy533055714> (дата обращения: 02.12.2023).

⁵ ГОСТ 9450-76. Государственный стандарт Союза ССР. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников = Measurements microhardness by diamond instruments indentation : разработан и внесен Академией наук СССР : введен 1977-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869?ysclid=lqgi0odv47417566802> (дата обращения: 02.12.2023).

3. Результаты и обсуждение

Согласно *визуальному осмотру* повреждение шестерни 1 представляет собой практически полный износ до основания ножки зуба на высоту и ширину зацепления с ответным зубчатым колесом – шестерней 2. Поверхность повреждения шестерни 1 в зоне износа имеет следы пластической деформации. При этом торцевые поверхности зубчатого венца шестерни 1, не входившие в зацепление, остались неповрежденными (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид шестерни 1 с повреждениями
Fig. 1. Appearance of gear 1 with damages

При детальном изучении торцевых поверхностей зубчатого венца со стороны вала меньшего диаметра (рис. 1) обнаружено семь радиальных трещин глубиной до 5–10 мм, берущих начало у основания ножки зуба на нагруженной стороне и развивающихся в тело шестерни по вогнутой кривой. Наличие трещин подтверждено результатами неразрушающего контроля методом магнитопорошковой дефектоскопии. При этом признаков полного излома не наблюдается ни на одном зубе, и вероятной преобладающей причиной повреждения представляется износ зубьев.

Повреждение шестерни 2 имеет ряд особенностей. Контактная поверхность всех зубьев шестерни (со стороны нагружения) имеет следы выкрашивания и пластической деформации, выводящей геометрические размеры профиля зубьев за пределы требований чертежа на изготовление (рис. 2, 3). На поверхности зубчатого венца наблюдается полный излом четырех зубьев – трех подряд и одного обособленно (рис. 4, 5). Кроме того, выявлено множество радиальных трещин (более тридцати) протяженностью до 20 мм, берущих начало у основания ножки зуба на нагруженной стороне и развивающихся в тело шестерни как по вогнутым, так и по выпуклым кривым (рис. 4–6). Наличие трещин также подтверждено

результатами неразрушающего контроля – методом магнитопорошковой дефектоскопии.



Рис. 2. Поверхность повреждения зуба шестерни 2 (сторона нагружения)
Fig. 2. Damage surface of the tooth of gear 2 (load side)



Рис. 3. Поверхность повреждения зуба шестерни 2
Fig. 3. Damage surface of the tooth of gear 2



Рис. 4. Внешний вид шестерни 2 с повреждениями
Fig. 4. Appearance of gear 2 with damages



Рис. 5. Излом зубьев шестерни 2
Fig. 5. Teeth failure of gear 2



Рис. 6. Радиальные трещины в основании зубьев шестерни 2

Fig. 6. Radial cracks at the base of gear 2 teeth

Химический анализ металла деталей проводился для установления соответствия состава материала требованиям изготовителя. Результаты приведены в таблице 2.

По полученным данным видно, что химический состав металла исследованных деталей отличается от состава стали 8620-Н. В то же время следует отметить, что шестерни изготовлены из конструкционной стали аналогичного структурного класса, состав которой содержит несколько большее количество легирующих элементов.

Для изучения особенностей структуры металла поврежденных зубчатых колес металлографическими и фрактографическими методами были отобраны образцы с различных участков: с рабочей поверхности и основной части зубьев в продольном и поперечном сечении, а также с поверхности излома. У шестерни 1 отбирались образцы металла с сохранившегося торца зуб-

чатого венца. После многократной шлифовки и полировки травление подготовленных образцов проводилось 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

В результате исследования установлено, что микроструктура обоих шестерен во всех исследованных сечениях имеет практически идентичное игольчатое строение, представляющее собой продукты отпуска мартенсита, соответствующее трооститу отпуска (рис. 7, 8) [7–9]. Размер исходного аустенитного зерна колеблется в пределах 15–30 мкм. Грубых неметаллических включений, металлургических дефектов, способных спровоцировать развитие повреждения, не обнаружено.

По наружной поверхности зубчатого венца обеих шестерен имеется слой повышенной травимости, что может быть следствием высокого содержания углерода. Таким образом, можно заключить, что поверхность зубьев подвергалась химико-термической обработке – цементации. Толщина слоя на всех исследованных участках равномерна и составляет порядка 1 мм. Структура металла слоя также имеет игольчатое строение и представляет собой, вероятнее всего, троостит.

При изучении структуры металла в зоне зарождения и распространения трещин установлено, что фронт распространения повреждений не сопровождался пластической деформацией, а проходил преимущественно по транскристаллитному механизму, что характерно для развития хрупких повреждений. В процессе разрушения трещины несколько раз меняли свое направле-

Таблица 2/Table 2

Химический анализ исследуемых деталей
Chemical analysis of tested parts

Образец	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Шестерня 1	0.23	0.26	0.49	0.015	0.007	0.90	0.15	2.85
Шестерня 2	0.27	0.35	0.42	0.015	0.010	1.91	0.22	1.29
Требования для стали 8620-Н								
AISI/SAE	0.17–0.23	0.15–0.35	0.60–0.95	≤0.040	≤0.030	0.35–0.65	0.15–0.25	0.35–0.75

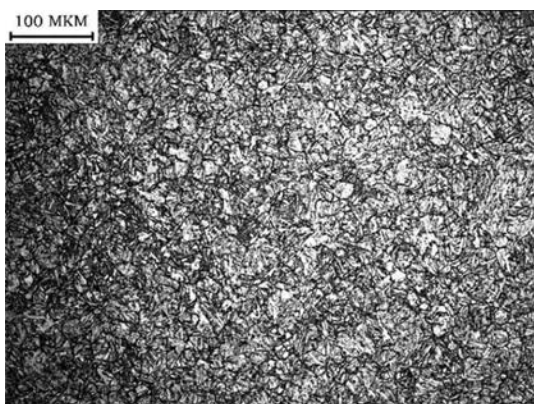


Рис. 7. Микроструктура основного металла шестерни 1
Fig. 7. Base metal microstructure of gear 1

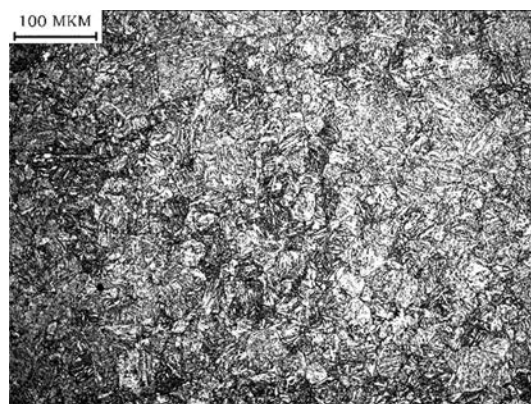


Рис. 8. Микроструктура основного металла шестерни 2
Fig. 8. Base metal microstructure of gear 2

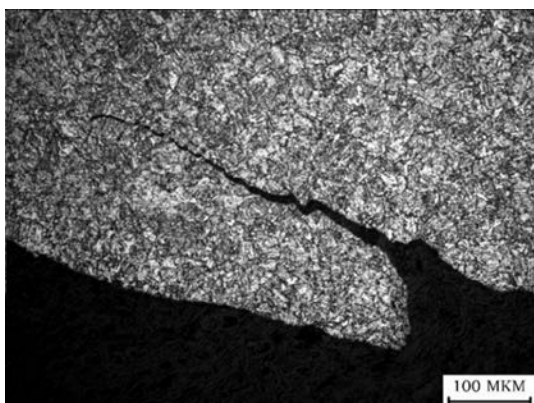


Рис. 9. Распространение повреждений в основном металле шестерни 1
Fig. 9. Spread of damages in the base metal of the gear 1

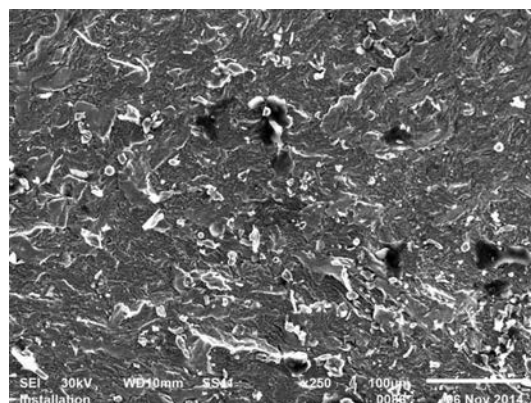


Рис. 10. Поверхность трещины у основания зуба в металле шестерни 1
Fig. 10. Crack surface at the tooth base in the gear 1 metal

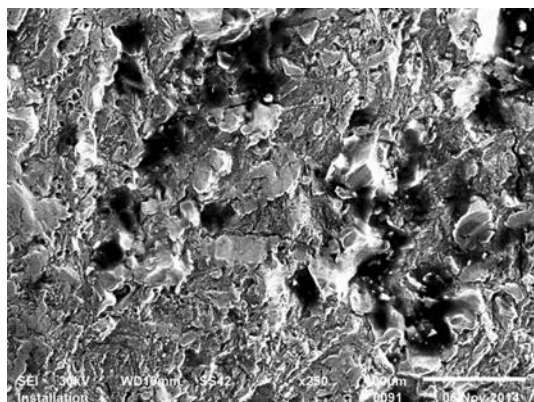


Рис. 11. Поверхность трещины у основания зуба в металле шестерни 2
Fig. 11. Crack surface at the tooth base in the gear 2 metal

ние, раздваивались, что характерно для многократного приложения нагрузки (рис. 9).

Фрактографическими исследованиями поверхности с целью изучения морфологии распространения трещин установлено, что повреждения развивались по механизму квазискола, характерного для хрупкого разрушения сталей, имеющих в микроструктуре продукты отпуска мартенсита (рис. 10, 11), что в свою очередь подтверждается наличием хорошо различимых небольших фасеток квазискола и дисперсных выделений карбидов в зоне разрушения [10, 11].

Измерение твердости металла поврежденных деталей проводилось на микрошлифах, изготовленных в нормальном сечении профиля

зубчатого венца. Схема проведения измерения на шестерне 2 приведена на рис. 12. На шестерне 1 измерения проводились по идентичной схеме [12–15]. Результаты измерений приведены в таблице 3.



Рис. 12. Схема измерения твердости на зубе: шестерня 1 – шаг измерения 0.15 мм; шестерня 2 – шаг измерения 0.2 мм
Fig. 12. Tooth hardness measurement scheme: measurement step 0.15 mm for gear 1; measurement step 0.2 mm for gear 2

Согласно полученным результатам, при эффективной толщине, составляющей порядка 1 мм, твердость цементованного слоя колеблется в пределах 41–43 HRC (402–429 HV) для шестерни 1 и 46–47 HRC (455–473 HV) для шестерни 2, что не соответствует требованиям технических условий (58–60 HRC). Твердость основного металла зубьев составляет 33 HRC для шестерни 1 и 41 HRC для шестерни 2 в соответствии с ГОСТ 9013-59 (ISO 6508-86)⁶.

Использованная в процессе анализа разрушенных шестерен методология исследования, основанная на совокупности определения механических характеристик металла, его структурного состояния и морфологии поверхности разрушения считается в достаточной степени общепринятой и может применяться для выявления причин разрушения различных деталей или элементов конструкций с учетом их условий эксплуатации.

По результатам проведенного исследования установлено, что представленным зубчатым колесам проведена упрочняющая химико-термическая обработка. На поверхности зубчатого венца шестерен получен цементованный слой

Таблица 3/ Table 3

Результаты измерения твердости
Hardness measurement results

Расстояние от торца детали, мм															
Шестерня 1	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20	1.35	1.0	1.65	1.80	1.95	2.10	2.25
HV _{0.5}	420	402	402	402	386	402	402	386	371	356	343	343	330	330	318
Шестерня 2	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
HV _{0.5}	479	501	479	501	479	458	458	438	438	438	420	402	402	402	402

⁶ ГОСТ 9013-59 (ISO 6508-86). Межгосударственный стандарт. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу = Metals. Method of measuring Rockwell hardness : разработан и внесен Центральным научно-исследовательским институтом черных металлов Министерства черной металлургии СССР : утвержден и введен в действие Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР 04.02.59 : введен 1969-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004663?ysclid=lqgib2r1jf526394744> (дата обращения: 02.12.2023).

достаточной толщины. Однако твердость полученного слоя значительно ниже требуемых техническими условиями значений.

Получение неудовлетворительных значений твердости могло быть вызвано следующими факторами:

1) неполной закалкой цементованного слоя при отступлении от оптимальных режимов проведения операции закалки;

2) повышенной (до 400–450 °С) температурой отпуска оптимально закаленной цементованной детали;

3) значительным (до 400–450 °С) и продолжительным по времени локальным перегревом деталей в процессе эксплуатации.

Анализируя указанные обстоятельства, можно предположить, что фактор № 3 при условии нормального функционирования системы снабжения редуктора маслом является маловероятным. Кроме того, в данных обстоятельствах повреждение шестерни 1 проходило бы по несколько иному механизму. Фактор № 2 также представляется маловероятным ввиду необходимости значительного отступления от технологии проведения термической обработки закаленной детали – повышения температуры отпуска стали более чем на 200 °С. В данном случае наиболее вероятной причиной недостаточной твердости готовых деталей является фактор № 1, а именно – отступление от оптимальных режимов термообработки, выражающееся в проведении закалки с более низкой температурой, либо охлаждение со скоростью ниже требуемых значений. Указанные в совокупности обстоятельства и спровоци-

ровали преждевременный выход из строя зубчатых колес ввиду недостаточных прочностных характеристик металла зубьев.

4. Заключение

Химический состав металла разрушенных шестерен отличается от заявленного в технических условиях, но в то же время наличие в химическом составе большего количества хрома компенсируется повышенным содержанием никеля, что делает данную сталь структурно аналогичной заявленной.

Микроструктура металла обоих элементов идентична и не имеет металлургических и явных технологических дефектов, способных спровоцировать разрушение.

По наружной поверхности зубчатого венца и впадине имеется измененный по химическому составу слой, по структуре и толщине соответствующий цементованному; твердость слоя не соответствует требованиям технических условий на изготовление деталей.

На основании анализа возможных причин разрушения зубчатых колес, условий работы верхнего привода буровой установки, а также факторов, влияющих на повышение долговечности и работоспособности зубчатых передач, можно сказать, что причиной разрушения шестерен в процессе эксплуатации явилось нарушение технологии термической обработки, приведшее к снижению поверхностной твердости и, как следствие, интенсивному изнашиванию и излому зубьев у основания за счет радиальных трещин, развивающихся по вогнутым и выпуклым кривым в тело шестерен.

Библиографический список

1. Причины разрушений зубчатых колес / А. П. Яковлева, Л. В. Савельева, В. А. Наумов [и др.]. – Текст : непосредственный // Главный механик. – 2017. – № 1. – С. 43–48.
2. Морозова, Л. В. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации / Л. В. Морозова, М. Р. Орлов. – DOI 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48. – Текст : непосредственный // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1 (38). – С. 37–48.
3. Комплексный анализ эксплуатационного разрушения зубчатых колес коробок передач / Г. Г. Винокуров, С. П. Яковлева, М. И. Васильева, С. Н. Махарова. – Текст : непосредственный // Конструкторское бюро. – 2016. – № 1. – С. 40–46.
4. Принципы отказов и критерии предельных состояний высоконагруженных деталей узлов трения, зубчатых приводов для машиностроения / Е. И. Тескер, О. Д. Косов, К. А. Лубчинский, А. В. Соломатин. – Текст : непосредственный // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2017. – № 5. – С. 17–20.

5. Некоторые особенности расчета долговечности узлов и деталей машин / М. Ю. Карелина, И. В. Костюк, Т. Ю. Черепнина, В. Р. Рогов. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-3-25-30. – Текст : непосредственный // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 25–30.
6. Анферов, В. Н. К расчету зубчатых и червячных передач при переменных режимах нагружения / В. Н. Анферов, А. В. Зайцев. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 4 (39). – С. 40–46.
7. Федоров, С. К. Закалка зубчатых колес силовых редукторов / С. К. Федоров, М. В. Власов. – Текст : непосредственный // Сельский механизатор. – 2019. – № 1. – С. 37–38.
8. Семенов, М. Ю. Оценка влияния условий трения на контактную выносливость подвергнутых химико-термической обработке зубчатых колес из комплексно-легированных теплостойких сталей / М. Ю. Семенов. – Текст : непосредственный // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 1. – С. 70–79.
9. Испытание, СЭМ-контроль и поверхностная модификация зубчатых колес, изготовленных традиционными и аддитивными технологиями / Л. Г. Варепов, И. В. Нагорнова, Ф. А. Доронин [и др.]. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-2-4-12. – Текст : непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 4–12.
10. Патент № 2449258 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/00. Способ исследования поверхности разрушения стали методом растровой электронной микроскопии : № 2010152046/28 : заявл. 21.12.2010 : опубл. 27.04.2012 / В. И. Изотов, Е. Ю. Киреева ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ФГУП «ЦНИИ-чермет им. И.П. Бардина»). – Текст : непосредственный.
11. Комплексная фрактодиагностика авиационных конических зубчатых колес / Н. В. Туманов, Н. А. Воробьева, А. И. Калашникова [и др.]. – DOI 10.26896/1028-6861-2018-84-2-55-63. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 2. – С. 55–63.
12. Шеховцева, Т. В. Оценка контактных разрушений зубьев по боковым поверхностям / Т. В. Шеховцева, Е. В. Шеховцева. – DOI 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-103-111. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 4-2(342). – С. 103–111.
13. Осипов, И. Г. Экспериментальная оценка твердости поверхностного слоя при разрушении / И. Г. Осипов, В. Н. Панчехин, И. Е. Звонарев. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2017. – № 18-1. – С. 66–70.
14. Руденко, С. П. Построение кривых глубинной контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С. П. Руденко, А. Л. Валько. – DOI 10.46864/1995-0470-2022-2-59-47-53. – Текст : непосредственный // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 2 (59). – С. 47–53.
15. Онишков, Н. П. К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес / Н. П. Онишков, В. И. Короткин. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-13. – Текст : непосредственный // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 5–13.

References

1. Iakovleva, A. P., Savelieva, L.V., Naumov, V. A., Sharapov, S. N., & Bessudnov, L. I. (2017). Causes of gear wheels damage. *Glavnyy Mekhanik*, (1), pp. 43-48. (In Russian).
2. Morozova, L. V., & Orlov, M. R. (2015). Research of failure causes of cogwheels in operational process. *Aviation Materials and Technologies*, (S1(38)), pp. 37-48. (In Russian). DOI 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48.
3. Vinokurov, G. G., Yakovleva, S. P., Vasilieva, M. I., & Makharova, S. N. (2016). Integrated analysis of operative failure of gear box wheeled pinions. *Konstruktorskoe Byuro*, (1), 40-46. (In Russian).
4. Tesker, E. I., Kosov, O. D., Lubchinskiy, K. A., & Solomatin, A. V. (2017). Printsipy otkazov i kriterii predel'nykh sostoyaniy vysokonagruzhennykh detaley uzlov treniya, zubchatykh privodov dlya mashinostroeniya. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*, (5), pp. 17-20. (In Russian).
5. Karelina, M. Yu., Kostyuk, I. V., Cherepnina, T. Yu., & Rogov, V. R. (2020). Some features of calculating durability of machine components and parts. *Vestnik IZHGTU Imeni M.T. Kalashnikova*, 23(3), pp. 25-30. (In Russian). DOI 10.22213/2413-1172-2020-3-25-30.
6. Anferov, V. N. & Zaitsev, A. V. (2016). Calculation of gear and worm gears operating in variable loading mode. *The Siberian Transport University Bulletin*, (4(39)), pp. 40-46. (In Russian).
7. Fedorov, S. K., & Vlasov, M. V. (2019). Tempering gears of power gearboxes. *Selskiy Mechanizator*, (1), 37-38. (In Russian).

8. Semenov, M. Yu. (2015). Assessing the impact of the conditions of friction on the contact endurance of gears from a complex-alloyed heat resistant steels subjected to thermo-chemical treatment. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, (1), 70-79. (In Russian).
9. Varepo, L. G., Nagornova, I. V., Doronin, F. A., Gusev, S. V., Bablyuk, E. B., & Nazarov, V. G. (2018). Testing, SEM-characterization and surface modification of gear wheels produced by additive and traditional technics. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 6(2), pp. 4-12. (In Russian). DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-2-4-12.
10. Izotov, V. I., & Kireeva, E. Ju. Method of investigating fractured steel surface using raster electron microscopy. Patent na izobretenie 2449258 C1, MPK G01N 21/00. No. 2010152046/28. Applied: 21.12.2010. Published: 27.04.2012. (In Russian).
11. Tumanov, N. V., Vorobjeva, N. A., Kalashnikova, A. I., Kalinin, D. V., & Kozharinov, E. V. (2018). Complex failure diagnosis of aviation bevel gears. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*, 84(2), pp. 55-63. DOI 10.26896/1028-6861-2018-84-2-55-63.
12. Shehovtseva, T. V., & Shehovtseva, E. V. (2020). The estimation of gears contact failures over the tooth surfaces. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, (4-2(342)), pp. 103-111. (In Russian). DOI 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-103-111.
13. Osipov, I. G., Panchchekhin, V. N., & Zvonarev, I. E. (2017). Experimental estimation of surface of surface layer in destruction. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire*, (18-1), pp. 66-70. (In Russian).
14. Rudenko, S. P., & Valko, A. L. (2022). Construction of deep contact fatigue curves for surface-hardened gear wheels. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (2(59)), pp. 47-53. (In Russian). DOI 10.46864/1995-0470-2022-2-59-47-53.
15. Onishkov, N. P., & Korotkin, V. I. (2017). To estimation of contact-fatigue durability of thermo-chemically strengthened gears. *Vestnik of Don State Technical University*, 17(3(90)), pp. 5-13. (In Russian). DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-13.

Сведения об авторах

Плеханов Владимир Иванович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: plehanovvi@tyuiu.ru. ORCID 0009-0000-8131-4340

Коленчин Николай Филиппович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и технологий конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: kolenchinnf@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-6776-0547

Китаев Владимир Владимирович, доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: kitaevvv@tyuiu.ru. ORCID 0009-0004-9826-4502

Information about the authors

Vladimir I. Plehanov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Materials Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: plehanovvi@tyuiu.ru. ORCID 0009-0000-8131-4340

Nikolay F. Kolenchin, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Materials Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: kolenchinnf@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-6776-0547

Vladimir V. Kitaev, Associate Professor at the Department of Materials Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: kitaevvv@tyuiu.ru. ORCID 0009-0004-9826-4502