



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ/MATERIALS SCIENCE

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.110> EDN: DSAWHG

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Научная статья

Вдовина Е.Е.^{1,*}, Бондарева О.С.²¹ORCID : 0009-0006-5409-2520;²ORCID : 0000-0002-4273-2483;^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (elizabeth.elizabeth2002[at]yandex.ru)

Предложена: 25.11.2025; Принята: 04.08.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

Стальные канаты грузоподъёмных механизмов, эксплуатирующиеся в агрессивных средах, подвержены преждевременному разрушению, что создаёт угрозу промышленной безопасности. Особую опасность представляют кислотные среды, способные инициировать процессы водородного охрупчивания. Для установления причин досрочного разрушения стальных оцинкованных канатов на линии горячего цинкования и для разработки рекомендаций по повышению их долговечности проведены макро- и микроструктурные исследования, элементный анализ на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), механические испытания на растяжение и трёхточечный изгиб, а также коррозионные испытания в соляной кислоте с ингибиторами и без них. Установлено, что разрушение каната вызвано комплексным воздействием эксплуатационных факторов. Выявлено практически полное истирание цинкового покрытия и признаки фреттинг-коррозии. Механические испытания показали критическое снижение прочности разрушенного каната на 58% и циклической стойкости при изгибе в 3 раза, что свидетельствует о водородном охрупчивании. Коррозионные испытания подтвердили высокую эффективность ингибитора уротропина. Показано, что основной причиной разрушения является водородное охрупчивание, вызванное воздействием паров соляной кислоты на сталь, лишённую цинкового покрытия. Для продления срока службы канатов рекомендовано применение ингибиторов коррозии на основе уротропина и внедрение системы регулярного инструментального контроля.

Ключевые слова: стальной канат, водородное охрупчивание, фреттинг-коррозия, коррозионные испытания, ингибитор коррозии, прочностные характеристики.

THE INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF STEEL CABLES

Research article

Vdovina E.E.^{1,*}, Bondareva O.S.²¹ORCID : 0009-0006-5409-2520;²ORCID : 0000-0002-4273-2483;^{1,2} Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (elizabeth.elizabeth2002[at]yandex.ru)

Suggested: 25.11.2025; Accepted: 04.08.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

Steel cables used in hoisting mechanisms operating in corrosive environments are prone to premature failure, which poses a threat to industrial safety. Acidic environments, which can trigger hydrogen embrittlement processes, present a particular danger. To determine the causes of premature failure of galvanised steel cables on a hot dip galvanising line and to develop recommendations for improving their durability, macro- and microstructural examinations, elemental analysis using a scanning electron microscope (SEM), mechanical tests for tensile strength and three-point bending, as well as corrosion tests in hydrochloric acid with and without inhibitors. It was established that the failure of the wire cable was caused by the combined effect of operational factors. Virtually complete abrasion of the zinc coating and signs of fretting corrosion were identified. Mechanical tests showed a critical reduction in the strength of the failed rope by 58% and a three-fold reduction in cyclic bending endurance, indicating hydrogen embrittlement. Corrosion tests confirmed the high effectiveness of the urotropine inhibitor. It has been shown that the main cause of failure is hydrogen embrittlement caused by the exposure of zinc-free steel to hydrochloric acid vapours. To extend the service life of the cables, it is recommended that urotropine-based corrosion inhibitors be used and that a system of regular instrumental monitoring be introduced.

Keywords: steel cable, hydrogen embrittlement, fretting corrosion, corrosion testing, corrosion inhibitor, strength characteristics.

Введение

Стальные канаты являются ключевым элементом грузоподъёмных механизмов, от надёжности которого зависит безопасность и бесперебойность технологических процессов в таких отраслях, как горнодобывающая промышленность, строительство и металлургия [1]. Особенно тяжёлые условия эксплуатации характерны для производств, связанных с агрессивными средами [2]. На линиях горячего цинкования оборудование постоянно подвергается комплексному воздействию механических нагрузок, абразивного износа и паров кислот, что приводит к преждевременному выходу канатов из строя [3]. Анализ механизмов деградации стальных канатов в горной промышленности показывает, что наиболее опасными являются комбинированные виды износа, сочетающие механические и коррозионные факторы [4].

К традиционным деградиационным процессам, ограничивающим ресурс стальных канатов, относятся механический износ и усталость [5]. Однако в современных производственных реалиях, особенно в кислотных средах, на первый план выходят более сложные и опасные явления. Современные исследования показывают, что коррозионная агрессивность технологических атмосфер требует применения усовершенствованных моделей прогнозирования, учитывающих специфические климатические и химические параметры [6]. Комплексный подход к оценке коррозионной стойкости, включающий как лабораторные, так и натурные испытания, демонстрирует необходимость моделирования реальных условий для всесторонней оценки сопротивления материалов [7]. Исследования обрыва внутренних проволок стального каната подчёркивают важность разработки комплексных программ диагностики для обеспечения безопасности работы шахтных подъёмных установок [8].

Важнейшим фактором риска является фреттинг-коррозия, вызванная микросмещениями проволок друг относительно друга, которая способна инициировать процесс усталостного разрушения [9]. Новейшие работы в данной области подчеркивают, что для точного прогнозирования долговечности необходим комплексный подход, сочетающий аналитические и численные методы с экспериментальными данными по фреттингу-износу с учётом таких факторов, как смазка, температура и влажность [10], [11]. Вероятностные характеристики оценки прочности и ресурса стальных канатов, полученные на основании данных магнитной дефектоскопии, позволяют разрабатывать более точные методики оценки остаточного ресурса [12].

Для оборудования, работающего в кислотных средах, особую опасность представляет водородное охрупчивание — процесс, приводящий к резкому снижению пластичности и прочности металла [2], [3]. Актуальность этой проблемы подтверждается современной нормативной базой, регламентирующей требования к материалам, стойким к растрескиванию в агрессивных средах, содержащих сероводород [13]. Влияние параметров поверхностной обработки на водородное охрупчивание стальных крепёжных изделий демонстрирует, что процессы гальванопокрытия чистым цинком являются наиболее склонными к вызыванию внутреннего водородного охрупчивания [14].

Вопросы диагностики состояния канатов также эволюционируют. Если традиционным способом контроля остаётся визуальный осмотр [1], то современные экспериментальные исследования процесса разрыва проволоки подтверждают, что для оценки безопасности критически важны точные параметры натяжения и упругого удлинения, а использование различных типов проволок позволяет усовершенствовать методы контроля [11], [15]. Обзор и анализ современных средств контроля натяжения стальных канатов указывает на отсутствие надёжных автоматизированных систем мониторинга натяжения канатов в процессе эксплуатации шахтных подъёмных установок [16], [17].

Таким образом, несмотря на существующие исследования в области коррозии и износа канатов, влияние конкретной эксплуатационной среды — концентрированных паров соляной кислоты — на комплексное ухудшение их механических характеристик, особенно с позиции современных данных, изучено недостаточно.

Целью настоящей работы является установление причин преждевременного разрушения стального каната грузоподъёмного механизма, работающего в зоне травления линии горячего цинкования, с использованием комплекса современных методов анализа и разработка практических рекомендаций по повышению его долговечности.

Материалы и методы

Объекты исследования: исследовались фрагменты стальных оцинкованных канатов (марка стали У8 по ГОСТ 1435-99) грузоподъёмного механизма линии горячего цинкования. Использовались два типа образцов: канат, подвергшийся разрушению в процессе эксплуатации (через 2 месяца работы), и целый канат для сравнительного анализа. Условия эксплуатации: воздействие паров 30% соляной кислоты при температуре 40°C, нагрузка 10 т.

Методики исследований

Макро- и микроструктурный анализ проводился с использованием цифрового и оптического микроскопов (Axiovert 40 MAT) для оценки состояния поверхности и поперечного сечения проволок, выявления дефектов и коррозионных повреждений.

Элементный анализ поверхности выполнялся на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA SB с энергодисперсионным спектрометром OXFORD INCA x-act для определения химического состава поверхности и выявления зон коррозии.

Механические испытания. Испытания на растяжение проводились на универсальных испытательных машинах TIRAtest 2800 и Tinius Olsen для определения предела прочности целого и разрушенного канатов, а также их элементов (прядей и проволок). Испытания на перегиб проводились на приборе НГ 1–2 для определения количества циклов перегиба до разрушения проволок внешней оплётки.

Коррозионные испытания. Образцы проволок погружались в 30%-ный (масс.) раствор соляной кислоты без ингибитора и с добавлением ингибиторов (2% масс. уротропина и 2% масс. тиомочевины) в режиме циклического погружения (10 мин в растворе / 5 мин на воздухе, 6 циклов). По потере массы образцов рассчитывался отрицательный весовой показатель коррозии ($K_{\text{вес}}$) и эффективность ингибитора (Z).

Результаты и их обсуждение

В результате аварии на линии горячего цинкования над ванной с соляной кислотой для травления изделий произошёл обрыв в месте крепления траверсы, несущей цинкуемые изделия, одного из двух стальных канатов. Данные канаты удерживают траверсу только над ванной с кислотой, над остальными ваннами траверсу удерживают другие канаты из-за особенностей конструкции мостового крана, используемого на производстве. По этой причине корректно говорить о воздействии на канаты именно паров соляной кислоты, а не веществ, содержащихся в других ваннах на линии цинкования.

Образцы были отобраны из нерабочей зоны каната (намотана на барабан) и из рабочей зоны на расстоянии 10 м, 6 м и 2 м от крепления траверсы с подвергнувшегося разрушению и с целого канатов. Схема крепления траверсы и фотография процесса подготовки изделий к цинкованию на предприятии приведены на рисунке 1 (для удобства сопоставления схемы крепления и фотографии линия потолка расположена на одном уровне).

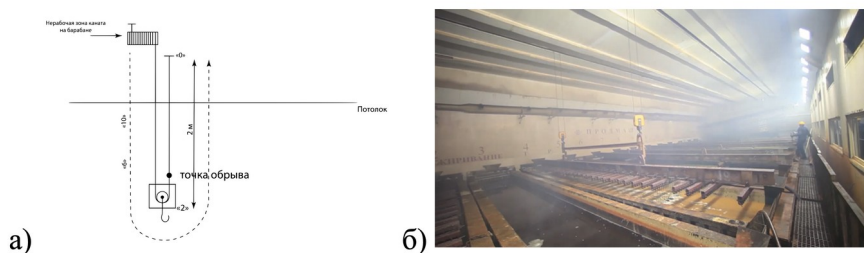


Рисунок 1 - Место отбора образцов для исследования:

а) схема крепления траверсы; б) фотография процесса подготовки изделий к цинкованию

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.110.1>

Эксплуатационные факторы, влияющие на состояние стальных канатов над ванной травления: пары соляной кислоты и трение в месте крепления траверсы, возникающее из-за её движения по канатам вследствие поднимания и опускания цинкуемых изделий в ванную.

Микроструктурный и элементный анализ

Макросъёмка образцов на различном расстоянии от крепления траверсы представлена на рисунке 2. Здесь и далее в работе: канат 1 и канат 2 — не подвергнувшиеся разрушению канаты, т.е. целые.

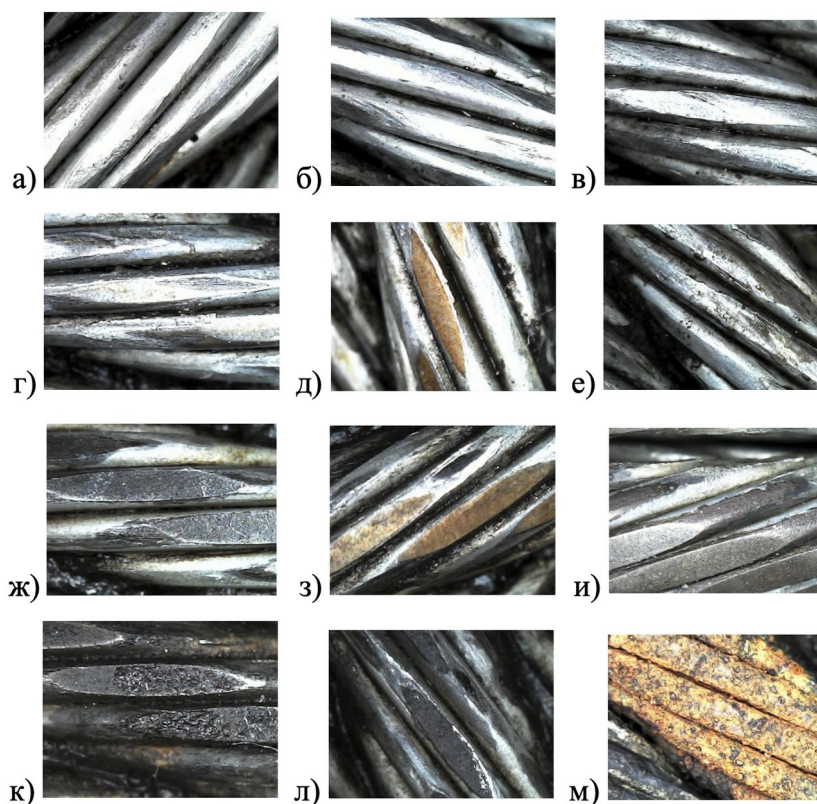


Рисунок 2 - Макросъёмка образцов:

а) канат 1, нерабочая зона у барабана; б) канат 2, нерабочая зона у барабана; в) канат, подвергшийся разрушению, нерабочая зона у барабана; г) канат 1, 10 м от крепления, рабочая зона; д) канат 2, 10 м от крепления, рабочая зона; е) канат, подвергшийся разрушению, 10 м от крепления, рабочая зона; ж) канат 1, 6 м от крепления, рабочая зона; з) канат 2, 6 м от крепления, рабочая зона; и) канат, подвергшийся разрушению, 6 м от крепления, рабочая зона; к) канат 1, 2 м от крепления, рабочая зона; л) канат 2, 2 м от крепления, рабочая зона; м) канат, подвергшийся разрушению, 2 м от крепления, рабочая зона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.110.2>

Микросъёмка наиболее повреждённых фрагментов образцов каната в поперечном сечении представлена на рисунке 3.

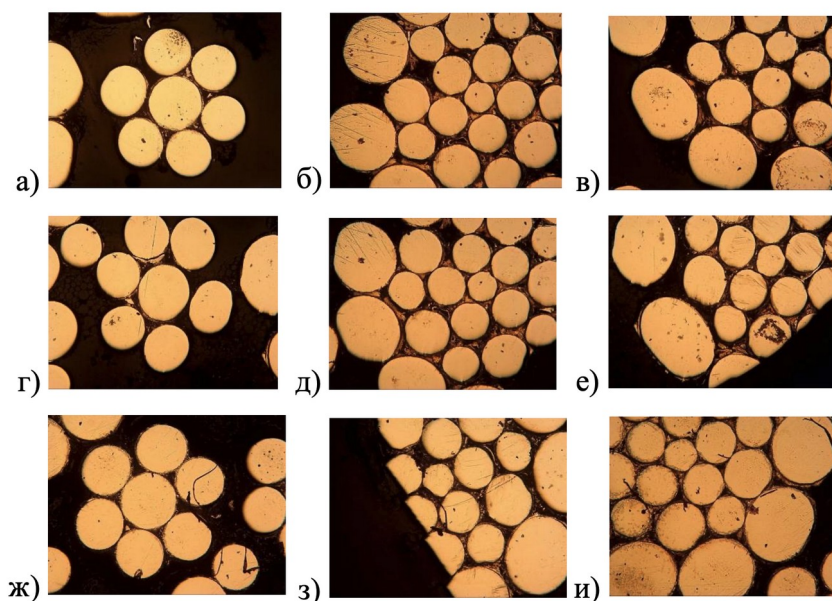


Рисунок 3 - Микросъёмка образцов (увеличение X50):
а), б), в) канат 1; г), д), е) канат 2; ж), з), и) канат, подвергшийся разрушению

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.110.3>

Макро- и микросъёмка выявили значительную разницу в состоянии поверхностей целого и разрушенного канатов. У разрушенного каната зафиксированы многочисленные участки с полностью стёртым цинковым покрытием («лыски») и утонение проволок. В поперечном сечении наблюдались продукты коррозии между внутренними проволоками, характерные для фреттинг-процессов.

Данные элементного анализа (табл. 1) подтвердили, что в рабочей зоне (вблизи крепления траверсы) цинковое покрытие практически полностью утрачено (содержание Zn снизилось с ~95% до ~1%), а поверхность сильно окислена (высокое содержание кислорода). Это свидетельствует об интенсивном воздействии агрессивной среды и механическом износе, ставших причиной обнажения стальной основы и её последующей коррозии.

Таблица 1 - Результаты элементного анализа поверхности проволок

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.110.4>

Канат 1. Поверхность проволоки образца, 2 м от крепления траверсы							
Спектр	O, % масс.	Si, % масс.	Cl, % масс.	Mn, % масс.	Fe, % масс.	Zn, % масс.	Итог, % масс.
Спектр 1	10,51	-	1,06	0,54	87,17	0,73	100,00
Спектр 2	21,49	0,52	2,62	0,48	70,90	3,99	100,00
Канат 2. Поверхность проволоки образца, 2 м от крепления траверсы							
Спектр 1	11,06	0,39	1,22	0,61	85,81	0,92	100,00
Спектр 2	9,40	-	1,00	0,67	87,86	1,07	100,00
Канат 2. Поверхность проволоки, нерабочая зона							
Спектр 1	2,42	-	-	-	2,56	95,02	100,00
Спектр 2	5,15	-	-	-	1,87	92,98	100,00

Оценка износа

Расчёт степени износа косвенным методом по РД РОСЭК 012-97 [6] показал, что износ целого каната составил 10%, в то время как разрушенного — 30%. Хотя оба значения формально допускают эксплуатацию, 30%-ный износ свидетельствует о значительной деградации материала.

Механические испытания

Результаты механических испытаний выявили сильное ухудшение свойств разрушенного каната.

Испытания на растяжение показали снижение предела прочности:

- для каната в целом: на 58% (с 5766 МПа до 2416 МПа),
- для пряди: на 70% (с 1933 МПа до 568 МПа),
- для отдельной проволоки: на 40% (с 1610 МПа до 955 МПа).

Испытания на перегиб показали, что проволоки разрушенного каната выдерживают в 3 раза меньше циклов до разрушения по сравнению с целыми (9 циклов против 27).

Такое резкое падение как прочности, так и пластичности (циклической стойкости) наряду с признаками механического истирания и коррозии свидетельствует о комплексном характере деградации материала, включая вероятный вклад водородного охрупчивания. Атомарный водород, выделяющийся при коррозионной реакции стали с соляной кислотой, диффундирует в металл, снижая его способность к пластической деформации и приводя к хрупкому разрушению.

Коррозионные испытания

Для оценки возможности защиты канатов были проведены коррозионные испытания с ингибиторами.

Результаты (табл. 2) демонстрируют высокую эффективность обоих ингибиторов, особенно уротропина, который снизил скорость коррозии более чем в 6 раз. Это открывает практический путь для продления срока службы канатов путём применения защитных смазок на его основе.

Таблица 2 - Эффективность ингибиторов коррозии

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.110.5>

Раствор электролита	Средний отрицательный весовой показатель коррозии $K_{\text{вес}}$, г/м ² ·ч	Эффективность ингибитора, Z, %
HCl (с = 30% масс., m = 60 г)	-239,1975	0,00
HCl и уротропин (с = 2% масс.)	-34,5743	88,55
HCl и тиомочевина (с = 2% масс.)	-64,7386	72,94
Образцы-свидетели	0,0000	0,00

Заключение

По результатам комплексного исследования установлены причины преждевременного разрушения стального каната в линии горячего цинкования:

1. Разрушение каната вызвано комплексом факторов: механическим истиранием проволок, коррозионным воздействием паров соляной кислоты и водородным охрупчиванием стали У8. На это указывает резкое снижение пластичности (в 3 раза) и прочности (на 58%) в сочетании с признаками фреттинг-коррозии и потерей цинкового покрытия.

2. Разрушению способствовало истирание цинкового гальванического покрытия в зоне крепления, что привело к обнажению стали и непосредственному контакту с агрессивной средой. Элементный анализ показал снижение содержания цинка на поверхности с 95% до 1%.

3. Внутренние повреждения каната характерны для фреттинг-коррозии, усугубляющей процесс деградации.

4. Подтверждена высокая эффективность ингибитора коррозии на основе уротропина (85,55%) в среде 30% соляной кислоты.

Практические рекомендации:

- для защиты канатов рекомендовано применение защитных смазок, содержащих ингибитор уротропин,
- необходимо внедрить систему регулярного инструментального контроля (например, магнитную дефектоскопию) для мониторинга состояния канатов, выходящего за рамки визуального осмотра,
- рассмотреть возможность использования канатов с более стойкими к кислотной среде покрытиями или конструкций с резиновыми демпфирующими элементами для снижения фреттинг-коррозии.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Талтыкин В.С. Основные виды износа и разрушения стальных канатов, применяемых в шахтных подъемных установках / В.С. Талтыкин // Московский государственный горный университет. — 2008. — 2. — С. 333–337.
2. Шолом В.Ю. Влияние смазочного материала на износостойкость стальных канатов, эксплуатирующихся в коррозионно-активных средах / В.Ю. Шолом, О.Л. Крамер, В.П. Головин и др. // Уфимский государственный авиационный технический университет. — 2021. — 2 (42). — С. 125–128. — DOI: 10.22226/2410-3535-2021-2-125-128

3. Будрин С.Б. Ресурс стальных канатов грузоподъемных машин / С.Б. Будрин // Проблемы транспорта Дальнего Востока. — 2019. — 11. — С. 66–71.
4. Таштанова В.О. К вопросу об обрыве внутренних проволок стального каната / В.О. Таштанова // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2019. — 4. — С. 212–215.
5. Головин В.П. Исследование долговечности стальных канатов в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации / В.П. Головин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2025. — 1(107). — С. 88–95. — DOI: 10.54708/19926502_2025_29110788
6. Панченко Ю.М. Оценка коррозионной агрессивности атмосферы и прогноз коррозионных потерь металлов / Ю.М. Панченко, А.И. Маршаков, Т.Н. Игонин и др. // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — 10. — С. 55–56.
7. Альхименко А.А. Методы коррозионных испытаний, применяемые при разработке и промышленном освоении новых судостроительных сталей и сплавов и технологий их производства. Обзор. Часть II. Испытания на коррозионное растрескивание и натурные морские испытания / А.А. Альхименко, А.Д. Давыдов, А.А. Харьков и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2022. — 3. — С. 154–162.
8. Таштанова В.О. Экспериментальные исследования процесса разрыва проволоки стального каната / В.О. Таштанова, А.Ш. Сарбалиев // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2022. — 1. — С. 153–158.
9. Клочков И.А. Особенности эксплуатации стальных канатов крестовой и односторонней свивки на строительных машинах роторного бурения / И.А. Клочков, М.А. Степанов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2023. — 18. — С. 61–66. — DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-61-66
10. Калентьев Е.А. К вопросу о долговечности стальных канатов / Е.А. Калентьев, В.В. Тарасов, В.Н. Новиков // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. — 2019. — 1. — С. 20–28.
11. Абрамов А.Н. Стендовые ресурсные испытания стальных канатов / А.Н. Абрамов, В.Ю. Шолом, О.Л. Крамер и др. // Письма о материалах. — 2020. — 2(38). — С. 195–199. — DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-195-199
12. Слесарев Д.А. Вероятностные характеристики оценки прочности и ресурса стальных канатов / Д.А. Слесарев, А.Н. Воронцов // Дефектоскопия. — 2016. — 2. — С. 55–62.
13. СТО ИНТИ S.00.3-2023. Материалы, стойкие к растрескиванию во влажном сероводороде: сборник. — Москва: Издательство Института нефтегазовых технологических инициатив, 2023. — 62 с.
14. Brahim S. Effect of Surface Processing Variables and Coating Characteristics on Hydrogen Embrittlement of Steel Fasteners / S. Brahim, S. Yue // Canadian Metallurgical Quarterly. — 2009. — 9. — P. 13–34.
15. Шасмутдинов М.М. Обзор и анализ современных средств контроля натяжения стальных канатов / М.М. Шасмутдинов, В.О. Таштанова // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2016. — 1. — С. 61–66.
16. РД РОСЭК 012-97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки: сборник. — Москва: Издательство стандартов, 1997. — 49 с.
17. ГОСТ 33718-2015. Краны грузоподъемные. Проволочные канаты. Уход и техническое обслуживание, проверка и отбраковки. — Введ. 2016-06-02. — Москва: Издательство стандартов, 2016. — 50 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Talty'kin V.S. Osnovny'e vidy' iznosa i razrusheniya stal'ny'x kanatov, primenyaemy'x v shaxtny'x pod'emny'x ustanovkax [The main types of wear and damage to steel ropes used in mine hoisting systems] / V.S. Talty'kin // Moscow State Mining University. — 2008. — 2. — P. 333–337. [in Russian]
2. Sholom V.Yu. Vliyanie smazochnogo materiala na iznosostojkost' stal'ny'x kanatov, e'kspluatiruyushhixsya v korrozionno-aktivny'x sredax [The effect of lubricant on the wear resistance of steel ropes used in corrosive environments] / V.Yu. Sholom, O.L. Kramer, V.P. Golovin et al. // Ufa State Aviation Technical University. — 2021. — 2 (42). — P. 125–128. — DOI: 10.22226/2410-3535-2021-2-125-128 [in Russian]
3. Budrin S.B. Resurs stal'ny'x kanatov gruzopod'yomny'x mashin [Resource of steel ropes for lifting machines] / S.B. Budrin // Problems of transport in the Far East. — 2019. — 11. — P. 66–71. [in Russian]
4. Tashtanova V.O. K voprosu ob obry've vnutrennix provolochek stal'nogo kanata [On the issue of breaking the internal wires of a steel rope] / V.O. Tashtanova // Proceedings of Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov. — 2019. — 4. — P. 212–215. [in Russian]
5. Golovin V.P. Issledovanie dolgovechnosti stal'ny'x kanatov v zavisimosti ot primenyaemogo smazochnogo materiala i vneshnix uslovij e'kspluatatsii [Study of the durability of steel ropes depending on the lubricant used and the external operating conditions] / V.P. Golovin // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. — 2025. — 1(107). — P. 88–95. — DOI: 10.54708/19926502_2025_29110788 [in Russian]
6. Panchenko Yu.M. Ocenka korrozionnoj agressivnosti atmosfery' i prognoz korrozionny'x poter' metallov [Assessment of atmospheric corrosion aggressiveness and prediction of metal corrosion losses] / Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, T.N. Igonin et al. // Industrial and civil engineering. — 2021. — 10. — P. 55–56. [in Russian]
7. Al'ximenko A.A. Metody' korrozionny'x ispy'tanij, primenyaemy'e pri razrabotke i promyshlennom osvoenii novy'x sudostroitel'ny'x stalej i spлавov i tehnologij ix proizvodstva. Obzor. Chast' II. Ispy'taniya na korrozionnoe rastreskivanie i naturny'e morskije ispy'taniya [Corrosion test methods used in the development and industrial application of new shipbuilding steels and alloys and their production technologies. Overview. Part II. Corrosion cracking tests and full-scale marine tests] / A.A. Al'ximenko, A.D. Davy'dov, A.A. Xar'kov et al. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. — 2022. — 3. — P. 154–162. [in Russian]



8. Tashtanova V.O. E'ksperimental'ny'e issledovaniya processa razry'va provoloki stal'nogo kanata [Experimental studies of the process of breaking a steel wire rope] / V.O. Tashtanova, A.Sh. Sarbaliev // Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov. — 2022. — 1. — P. 153–158. [in Russian]
9. Klochkov I.A. Osobennosti e'kspluatatsii stal'ny'x kanatov krestovoj i odnostoronnej svivki na stroitel'ny'x mashinax rotnogo bureniya [Features of using cross-wound and single-stranded steel ropes on rotary drilling construction machines] / I.A. Klochkov, M.A. Stepanov // Transport, Mining, and Construction Engineering: Science and Production. — 2023. — 18. — P. 61–66. — DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-61-66 [in Russian]
10. Kalent'ev E.A. K voprosu o dolgovechnosti stal'ny'x kanatov [On the durability of steel ropes] / E.A. Kalent'ev, V.V. Tarasov, V.N. Novikov // Bulletin of the Kalashnikov Izhevsk State Technical University. — 2019. — 1. — P. 20–28. [in Russian]
11. Abramov A.N. Stendovy'e resursny'e ispy'taniya stal'ny'x kanatov [Bench-top resource tests of steel ropes] / A.N. Abramov, V.Yu. Sholom, O.L. Kramer et al. // Letters about materials. — 2020. — 2(38). — P. 195–199. — DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-195-199 [in Russian]
12. Slesarev D.A. Veroyatnostny'e xarakteristiki ocenki prochnosti i resursa stal'ny'x kanatov [Probabilistic characteristics of assessing the strength and resource of steel ropes] / D.A. Slesarev, A.N. Voronczov // Flaw detection. — 2016. — 2. — P. 55–62. [in Russian]
13. STO INTI S.00.3-2023. Materialy, stojkie k rastreskivaniyu vo vlazhnom serovodorode: sbornik [Organization standard Institute of Oil and Gas Technological Initiatives S.00.3-2023 Materials Resistant to Cracking in Wet Hydrogen Sulfide: Collection]. — Moscow: Publishing House of the Institute of Oil and Gas Technological Initiatives, 2023. — 62 p. [in Russian]
14. Brahimi S. Effect of Surface Processing Variables and Coating Characteristics on Hydrogen Embrittlement of Steel Fasteners / S. Brahimi, S. Yue // Canadian Metallurgical Quarterly. — 2009. — 9. — P. 13–34.
15. Shasmutdinov M.M. Obzor i analiz sovremenny'x sredstv kontrolya natyazheniya stal'ny'x kanatov [Overview and analysis of modern means of controlling the tension of steel ropes] / M.M. Shasmutdinov, V.O. Tashtanova // Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov. — 2016. — 1. — P. 61–66. [in Russian]
16. RD ROSEK 012-97. Kanaty stal'nye. Kontrol' i normy brakovki: sbornik [Guidelines ROSEK 012-97 Steel Ropes. Control and Culling Standards: Collection]. — Moscow: Publishing House of Standards, 1997. — 49 p. [in Russian]
17. GOST 33718-2015. Krany gruzopod'emnye. Provolochnye kanaty. Uhod i tekhnicheskoe obsluzhivanie, proverka i otbrakovki [GOST 33718-2015 Cranes for lifting. Wire ropes. Care and maintenance, inspection and rejection]. — Introduction. 2016-06-02. — Moscow: Publishing House of Standards, 2016. — 50 p. [in Russian]