

УДК (UDC) 621.9.048.6:621.794

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНОГО КАНАТА ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ И  
ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ  
В УЗЛАХ СЧАЛКИINCREASE OF STEEL CHANNEL RESISTANCE THROUGH THE APPLICATION AND  
FORMATION OF ANTIFRICTION POWDER COATING IN THE KNOTSИванов В.В., Марченко Э.В., Панфилов А.В.  
Ivanov V.V., Marchenko E.V., Panfilov A.V.Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)  
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье представлены материалы по изучению вопроса повышения стойкости технически сложного витого изделия из проволок – стального каната. Авторами детально изучены механизмы и факторы образования дефектов, приводящих к браковке стального каната. Установлено, что причиной истирания и обрыва проволок прядей в замках (узлах) счалки является недостаточная их подвижность ввиду отсутствия необходимого количества смазочных материалов для нормальной работы стального каната. Применяемые смазочные материалы при изготовлении стального каната и его эксплуатации не отвечают предъявляемым требованиям по стойкости, что приводит к снижению срока службы (циклов нагружения), установленного заводом-изготовителем. Для решения задачи повышения стойкости стальных канатов, авторами предлагается новая методика формирования антифрикционного порошкового покрытия на основе дисульфида молибдена  $MoS_2$  в замках (узлах) счалки и на поверхности проволоки путем нагнетания под давлением сжатого воздуха антифрикционного порошкового материала и фиксации его на сложную поверхность методом местного упрочнения с применением шарико-стержневого упрочнителя. Экспериментальные испытания поверхностного слоя проволок стального каната из различного материала, покрытых антифрикционным порошком показали, что коэффициент трения снижается в 3...9 раз, а их износостойкость увеличилась в 4...20 раз. Приведены основные заключения, характеризующие наноразмерную картину микро/нанопрофиля исходной поверхности образца, проволоки стального каната из углеродистой стали по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 с покрытием антифрикционным порошком  $MoS_2$ .

**Ключевые слова:** стойкость, стальной канат, счалка, антифрикционное порошковое покрытие, пластическое деформирование, профиль поверхности, шарико-стержневое упрочнение.

Дата принятия к публикации: 28.03.2019  
Дата публикации: 25.06.2019

**Abstract.** The article presents materials on the study of the issue of increasing the resistance of technically complex twisted wire products-steel rope. The authors studied in detail the mechanisms and factors of formation of defects that lead to steel rope rejection. The cause abrasion and breakage of the wire strands in the locks (nodes) to couple the pusher is lack of mobility due to the lack of necessary quantity of lubricant for normal operation of a steel rope. The lubricants used in the manufacture of steel rope and its operation do not meet the requirements for durability, which leads to a decrease in the service life (loading cycles) established by the manufacturer. To solve the problem of increasing the resistance of steel ropes, the authors propose a new method of forming an antifriction powder coating based on molybdenum disulfide ( $MoS_2$ ) in the locks (nodes) of the coupler and on the surface of the wire by injection under pressure of compressed air antifriction powder material and fixing it on a complex surface by local hardening using a ball-rod hardener. Experimental tests of the surface layer of steel wire rope of different material coated with antifriction powder showed that the coefficient of friction is reduced from 3 to 9 times, and their wear resistance increased from 4 to 20 times. The main conclusions characterizing nanoscale pattern micro/nanoprobes the original surface of the sample, the steel wire rope of carbon steel according to GOST 1050 and GOST 14959. With anti-friction coating ( $MoS_2$ ), powder. From the presented drawings, the surface coated with molybdenum disulfide ( $MoS_2$ ) in comparison with the untreated becomes more flat, the micro-steps are rounded.

**Keywords:** durability, steel rope, anti-friction powder coating, plastic deformation, ball core strengthening, surface profile.

Date of acceptance for publication: 28.03.2019  
Date of publication: 25.06.2019



**Сведения об авторах:**

**Иванов Владимир Витальевич** – доктор технических наук, доцент, доцент каф. «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственной технической университет, [vivanov\\_dstu@mail.ru](mailto:vivanov_dstu@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5070-3925>

**Марченко Эдвард Викторович** – аспирант, ассистент, каф. «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственной технической университет, [daedwardrambler.ru@mail.ru](mailto:daedwardrambler.ru@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7027-7716>

**Панфилов Алексей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент каф. «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственной технической университет, [panfilov@ikcmysl.ru](mailto:panfilov@ikcmysl.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7211-1824>

**Authors' information:**

**Vladimir V. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, associate Professor, associate Professor of Department "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, [vivanov\\_dstu@mail.ru](mailto:vivanov_dstu@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5070-3925>

**Edward V. Marchenko** - postgraduate student, assistant lecturer of Department "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, [daedwardrambler.ru@mail.ru](mailto:daedwardrambler.ru@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7027-7716>

**Alexey V. Panfilov** – Candidate of Technical Sciences, associate Professor, associate Professor of Department "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, [panfilov@ikcmysl.ru](mailto:panfilov@ikcmysl.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7211-1824>

## 1. Введение

Актуальным вопросом в машиностроении является повышение стойкости ответственных деталей, находящихся в паре трения с различными изделиями. Одним из примеров такого технически сложного витого изделия из проволок выступает стальной канат в машинах, использующих канатную тягу. Стойкость стальных канатов во многом зависит от наличия и качества наружной и внутренней смазки, что особенно существенно, когда стальные канаты являются главным элементом всей системы и замена его является весьма трудоемкой операцией [6-8]. Для многих машин с канатной тягой, ввиду их конструктивных особенностей и эксплуатационного назначения, применяется канат замкнутого (бесконечного) типа. Способом получения такого каната является счалка. После получения замкнутого стального каната на участке сращивания (счаливания) происходит нарушение геометрического положения прядей и сердечника в их поперечном сечении.

## 2. Постановка задачи

В процессе изучения физико-механических свойств каната авторами было отмечено, что при огибании стальным канатом шкива (барабана) происходит взаимное перемещение прядей относительно друг друга. Ввиду конструктивной особенности счалки в стыковочных замках (узлах) пряди находятся в

жестко фиксированном состоянии. Образуется точечный или линейный контакт металла с металлом в паре трения «прядь-сердцевина-прядь», который в процессе эксплуатации стального каната прогрессирует до истирания проволок с последующими их обрывами. Авторами установлено, что из-за недостатка смазочных материалов в точке соприкосновения проволок они не обладают достаточной подвижностью для нормальной работы стального каната, вследствие чего происходит эффект закусывания прядей, а в дальнейшем и их преждевременный износ, и выхода из строя.

## 3. Разработанная методика

Для решение поставленной задачи одним из методов повышения стойкости стального каната авторами предлагается наносить на поверхность проволоки антифрикционный порошок молибдена на основе дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$ . Уникальные свойства антифрикционных порошковых покрытий типа дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  создают предпосылки для повышения износостойкости проволок, входящих в пары трения [1-4]. Дисульфид молибдена обладает слоистой структурой, в которой есть «прочные» и «плотные» слои, в достаточно большой степени удаленные друг от друга. При этом в слое, покрывающем поверхность трения, имеются сильные связи, тогда как связь между слоями слабая. Такие свойства антифрикционного покрытия обеспечивают «лёг-

кое» скольжение трущихся поверхностей проволок относительно друг друга, существенное снижение коэффициента трения и изнашивания пары трения. Высокая адгезия дисульфида молибдена к металлам обусловлена прочными молекулярными связями, образуемыми атомами серы с металлом [5]. Дисульфид молибдена имеет гексагональную слоистую решетку в форме призматического шестигранника. Такое строение кристаллической решетки обеспечивает наличие важных для смазочных материалов высоких адгезионных свойств.

#### 4. Экспериментальные результаты и их анализ

Была произведена экспериментальная проверка технологии нанесения и эксплуатационных характеристик антифрикционного порошкового покрытия  $\text{MoS}_2$  в замках счалки и на поверхности проволок стального каната в процессе нагнетания под давлением сжатого воздуха антифрикционного порошкового материала и фиксации его на сложной поверхности каната методом местного упрочнения с применением шарико-стержневого упрочнителя (рис. 1) [9]. Сравнительные испытания проводились на машине трения по стандартной методике. Результаты исследований представлены на (рис. 2-4).

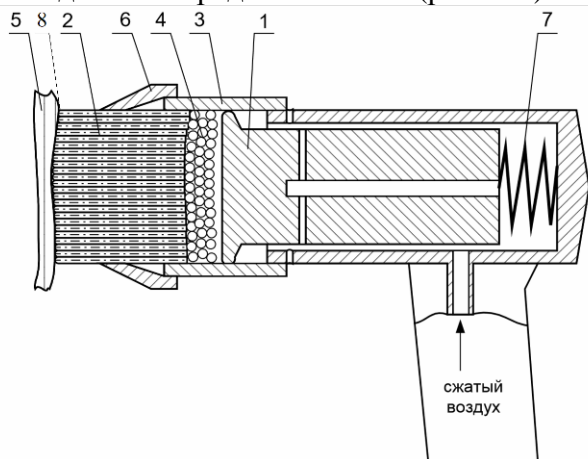


Рис. 1. Схема местного упрочнения с применением шарико-стержневого упрочнителя: 1-силовой привод; 2-пакет круглых стержней; 3-корпус упрочнителя; 4-стальные шары; 5-проволока стального каната; 6-цанговый зажим; 7- упругий элемент; 8-слой антифрикционного порошка дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$

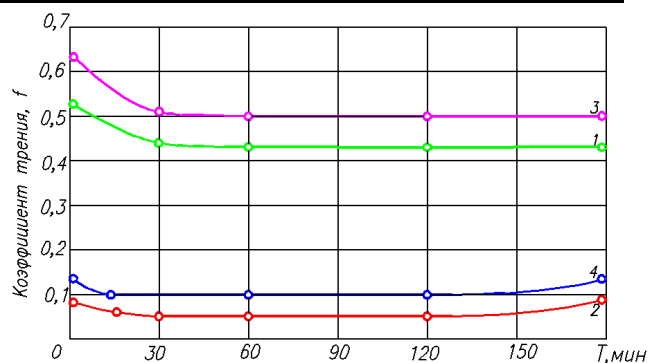


Рис. 2. Исследование коэффициента трения проволок стального каната в системе «прядь-сердцевина-прядь»: 1 - углеродистая сталь по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 - исходный материал проволок прядей каната; 2 - углеродистая сталь по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 - проволоки пряди каната покрытые дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$ ; 3 - углеродистая сталь по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 - исходный материал проволок прядей каната; 4 - углеродистая сталь по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 - проволоки пряди каната покрытые дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$ .

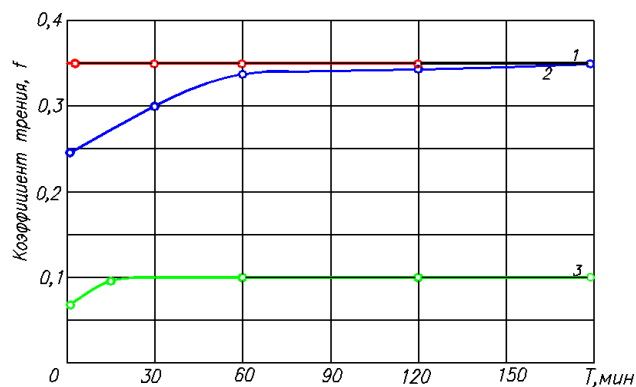


Рис. 3. Результаты испытаний образцов проволок стального каната из углеродистой стали по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 при трении качения с 20%-м проскальзыванием, нагрузке 400 Н ( $q = 900 \text{ кг/с/см}$ ) - при комнатной температуре: 1-исходные; 2- покрытые дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$  под давлением сжатого воздуха; 3- обработанные шарико-стержневым упрочнителем

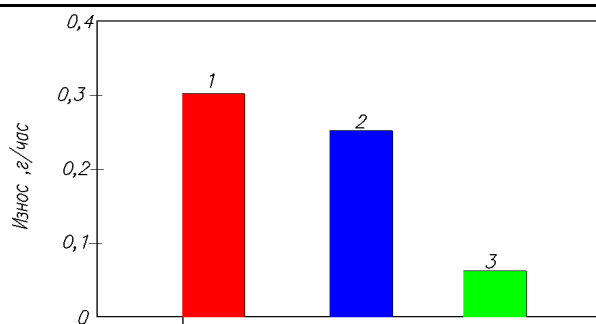


Рис 4. Износостойкость пар трения образцов проволок стального каната из углеродистой стали по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959:

1-исходные; 2- покрытые дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$  под давлением сжатого воздуха; 3- обработанные шариково-стержневым упрочнителем

Представленные результаты показывают, что процесс нанесения антифрикционного порошкового материала на основе дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  и фиксацией его на поверхности проволоки пряжи стального каната методом шариково-стержневого упрочнения приводит к снижению коэффициента трения и повышению износостойкости пар трения. Износ при работе в течении 3-х часов практически не отмечен. Наличие слоев различных атомов в структуре дисульфида молибдена создает условия легкого скольжения их плоскости спайности [9]. Известно, что пленка дисульфида молибдена толщиной 1 мкм состоит из 1600 слоев с плоскостями скольжения между ними.

Большое влияние на антифрикционные свойства покрытия оказывает наноразмерность и ориентация его частиц, а также нанорельеф поверхности основы. В процессе фиксации покрытия дисульфида молибдена пластическим деформированием обеспечивается ориентация частиц базовыми плоскостями параллельно плоскости скольжения и процесс приработки покрытия в этом случае практически отсутствует.

В зависимости от условий эксплуатации и материала проволок каната наблюдается снижение коэффициента трения в 3...9 раз и увеличение их износостойкости в 4...20 раз.

С целью изучения механизма образования антифрикционного порошкового покрытия  $\text{MoS}_2$  в процессе пластического деформирования шариково-стержневым упрочни-

телем исследован микро/нанофильс покрываемой поверхности и порошка  $\text{MoS}_2$ . Исследования проведены с использованием электронного микроскопа SUPRA25, позволяющего изучать поверхность металла и материал покрытия, вести непрерывный контроль процесса, электронно-лучевую литографию, вести анализ отказов и наблюдение материалов с ультра малыми размерами (нм) размерами зерен, анализ включений в сплавах и сталях, анализ изломов или разработку новых материалов [10, 11].

Ниже представлена серия снимков (рис.5, б), характеризующих наноразмерную картину микро/нанофильса исходной поверхности образца проволоки пряжи каната из стали по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959 и поверхности образца проволоки пряжи каната с покрытием антифрикционным порошком дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$ . Снимки произведены с различным увеличением и с различных позиций (изменением наклона предметного стола).

Полученные снимки дают представление о характере микро/нанофильса покрываемой поверхности проволоки пряжи каната и покрытия, осуществляющих важную роль в их соединении.

Интересные данные получены в результате изменения угла наклона предметного стола  $30^\circ$  (рис.6). Впервые получены фотографии покрытия в таком ракурсе без изготовления шлифа поверхности. Это дало воз-

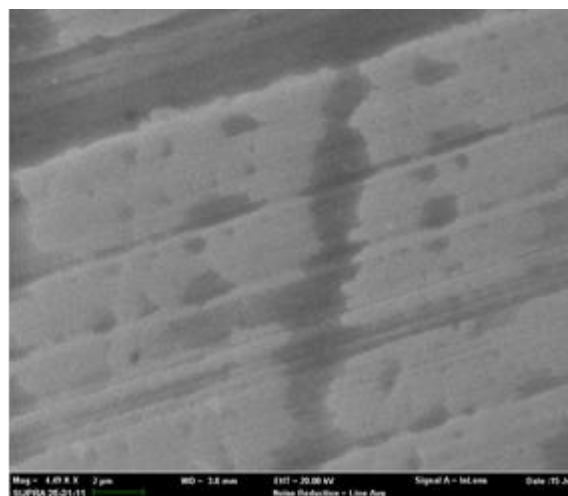


Рис.5. Исходный образец пряжи каната из углеродистой стали по ГОСТ 1050 или по ГОСТ 14959

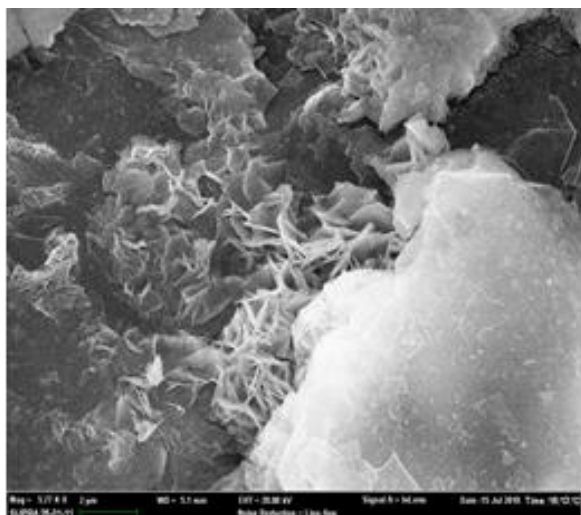


Рис.6. Покрытый дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$  образец проволоки пряди каната

можно увидеть внешний вид поверхности без физического изменения. На фотографиях отчетливо видно, что при наличии крупных слоистых микроструктур дисульфида молибдена 2...4 мкм (рис.6), образующих покрытие, присутствуют и нано структуры 100...200 нм, хаотично переплетенные между собой и крупными частицами. Данное построение антифрикционного покрытия придает дополнительный стимул для изучения и формирования новых композиционных покрытий с включением в состав материалов на микро/наноуровне. Одним из перспективных направлений, требующих глубоких исследований, является внедрение в покрытие Carbon NanoTube, обладающих исключительной прочностью (на порядок выше стали). Такое воздействие не приводит к их разрушению, но порождает разрыв ван-дер-ваальсовых связей в дисульфиде молибдена  $\text{MoS}_2$  с образованием монослоев. Монослой за счет сильного ковалентного взаимодействия между молекулами дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  будут либо сворачиваться в нанотрубку, либо за счет ван-дер-ваальсовских сил «прилипать» к покрытию Carbon NanoTube. Получаемое в этом случае покрытие будет обладать уникальными механическими и физическими свойствами.

Для исследований микрорельефа поверхности был использован сканирующий зондо-

вый микроскоп Nanoeducator, результаты представлены на (рис. 7.)

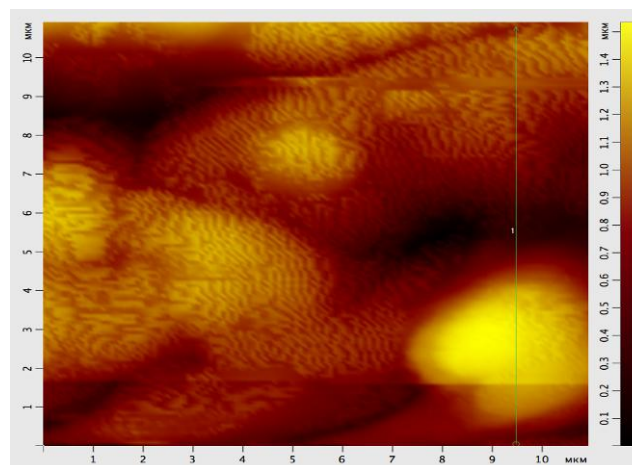


Рис.7. Микрорельеф поверхности пряди каната с нанесенным  $\text{MoS}_2$

Как видно из представленных рисунков, поверхность с покрытием дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$  по сравнению с необработанной становится более полой, микровыступы скруглены.

## 5. Заключение

Предлагаемая технологии нанесения антифрикционного порошкового покрытия дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  в замки (узлы) счалки и на поверхности проволоки стального каната в процессе нагнетания под давлением сжатого воздуха антифрикционного порошкового материала и фиксации его на поверхности методом местного упрочнения с применением шарико-стержневого упрочнителя открывает уникальные возможности для получения нового уровня свойств покрытий: высокой прочности, твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, достаточно высокой пластичности, сохраняя при этом высокие эксплуатационные свойства стального каната. Комбинированная методика обработки замков (узлов) счалки и поверхности стального каната позволили продлить ресурс и избежать эффекта истирания прядей друг относительно друга путем скольжения по плоскости контакта. Полученные результаты открывают пути дальнейших исследований возможности внедрения в покрытия микро/наноматериалов и углеродных нанотрубок.

## Список литературы

1. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Investigation of optimal chemical composition of cast aluminum alloys for vibrational mechanical-chemical polishing and deposition of protective and decorative coatings. XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, pp. 327-332

2. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Qualitative Characteristics of MoS<sub>2</sub> Solid-Lubricant Coating Formed by Vibro-Wave Impact of Free-Moving Indenters *Key Engineering Materials*, 2011, pp.18-22 DOI:10.4028/www.scientific.net/ KEM.736.18

3. Попов, С.И. Электрооборудование автомобилей / С.И. Попов, Н.С. Донцов, Ю.В. Марченко, В.В. Иванов, Г.А. Гальченко, Э.В. Марченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2018. – 235 с.

4. Марченко, Э.В. Технические измерения на транспорте / Э.В. Марченко, С.И. Попов, Ю.В. Марченко, Н.С. Донцов, В.В. Иванов, А.А. Скудина. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2017. - 81 с.

5. Попов, С.И. Технические средства диагностирования транспортных машин / С.И. Попов, Ю.П. Рункевич, Ю.В. Марченко, В.Ю. Валявин, Н.С. Донцов, В.В. Иванов. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. - 199 с.

6. Короткий, А.А. Стойкость несущего каната пассажирской подвесной канатной дороги / А.А. Короткий, Э.В. Марченко, А.В. Панфилов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. - №2.

7. Короткий, А.А. Счалка стального каната, проблемы и пути их решения / А.А. Короткий, А.В. Панфилов, Э.В. Марченко // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: Сб. материалов VIII Междунар. молодежной научн. конф., Саратов, 3-5 ноября 2018 г. - Саратов: СГТУ, 2018. - С.168-173.

8. Лагереv, И.А. Моделирование динамики пассажирской кабины транспортной системы «Канатное метро» / И.А. Лагереv, А.В. Лагереv, А.В. Панфилов Э.В. Марченко // Вестник Донского государст-

## References

1. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Investigation of optimal chemical composition of cast aluminum alloys for vibrational mechanical-chemical polishing and deposition of protective and decorative coatings. XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, pp. 327-332

2. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Qualitative Characteristics of MoS<sub>2</sub> Solid-Lubricant Coating Formed by Vibro-Wave Impact of Free-Moving Indenters *Key Engineering Materials*, 2011, pp. 18-22 DOI:10.4028/www.scientific.net/ KEM.736.18

3. Popov S.I., Dontsov N.S., Marchenko Yu.V., Ivanov V.V., Galchenko G.A., Marchenko E.V. *Elektrooborudovaniye avtomobiley* [Electrical equipment of automobiles]. Rostov-on-Don, DGTU, 2018. 235 p. (in Russian)

4. Marchenko E.V., Popov S.I., Marchenko Yu.V., Dontsov N.S., Ivanov V.V., Skudina A.A. *Tekhnicheskiye izmereniya na transporte* [Technical measurements on transport]. Rostov-on-Don, DGTU, 2017. 81 p. (in Russian)

5. Popov S.I., Runkevich Yu.P., Marchenko Yu.V., Valyavin V.Yu., Dontsov N.S., Ivanov V.V. *Tekhnicheskiye sredstva diagnostirovaniya transportnykh mashin* [Technical means of diagnosing transport vehicles]. Rostov-on-Don, DGTU, 2016. 199 p. (in Russian)

6. Korotkiy A.A., Marchenko E.V., Panfilov A.V. Persistence of a towing rope of a passenger aerial ropeway. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki*, 2018. No.2 (in Russian)

7. Korotkiy A.A., Panfilov A.V., Marchenko E.V. Steel wire rope, problems and solutions. *Nanomaterialy i nanotekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii Saratov, 3-5 noyabrya 2018 g. Saratov: Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy. Universitet*, 2018, p. 168-173 (in Russian)

8. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Panfilov A.V., Marchenko E.V. Modeling the dynamics of the passenger cabin of the ropeway metro system. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, Vol. 18,



венного технического университета. - 2018. - Т. 18. - № 1. - С. 16-21.

DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21

9. Лебедев, В.А. Методы обеспечения показателей качества реноизделий в авто-ремонтном производстве / В.А. Лебедев, Ю.В. Марченко, С.И. Попов, Э.В. Марченко, Н.С. Донцов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: Материалы 14-й Всеросс. научно-практ. конф. с международным участием, Старый Оскол, 23-24 ноября, Том I. - Старый Оскол, 2017. - С. 227-235.

10. Марченко, Э.В. Метод нанесения твердосмазочных материалов на стальной канат в процессе его производства / Э.В. Марченко, С.И. Попов, Ю.В. Марченко, Н.С. Донцов // Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: Сб. трудов Междунар. научн. симпозиума технологов-машинистроителей, Ростов-на-Дону, 3-6 октября. - Ростов н/Д, 2017. - С. 131-134.

11. Блюменштейн, В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложно профильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / В.Ю. Блюменштейн // Научно-технические технологии машиностроения. - 2017. - №8. - С. 7-16.

No. 1, pp 16-21 DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21 (in Russian)

9. Lebedev V.A., Marchenko Yu.V., Popov S.I., Marchenko E.V., Dontsov N.S. Methods of ensuring the quality indicators of car-repair products in car repair production. *Sovremennyye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: Materialy 14th Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, 23-24 noyabrya*, Vol. 1, Staryy Oskol, 2017, p. 227-235 (in Russian)

10. Marchenko E.V., Popov S.I., Marchenko Yu.V., Dontsov N.S. Method of applying solid lubricants on a steel rope in the process of its production. *Vibrovолnovyye protsessy v tekhnologii obrabotki detaley vysokotekhnologichnykh izdeliy: Sbornik trudov mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma tekhnologov-mashinostroyiteley, 3-6 oktyabrya*, Rostov-on-Don, 2017, p. 131-134 (in Russian)

11. Blumenshtein V.Yu. Mechanical technological inheritance as a scientific basis for designing complex profile tools for hardening treatment of surface plastic deformation. *Naukoyemkiye tekhnologii mashinostroyeniya*, 2017, No. 8, pp. 7-16 (in Russian)