

УДК 622.673.6

DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-20-28

## К ВОПРОСУ О ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ\*

**Е. А. Калентьев**, кандидат технических наук, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

**В. В. Тарасов**, доктор технических наук, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

**В. Н. Новиков**, аспирант, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

*Рассматривается вопрос оценки долговечности стальных канатов, работающих на блоках с учетом контактного взаимодействия проволок. Описаны основные виды напряжений, возникающих при эксплуатации стальных канатов. Приведены сведения, необходимые для проведения испытаний стальных канатов на долговечность при изгибе. Для определения долговечности стальных канатов при работе на блоках используются эмпирические зависимости, учитывающие множество факторов: действующую нагрузку, отношение диаметров каната и блока, предел прочности материала проволок, диаметр каната, длину пробега каната по блоку, тип сердечника, форму канавки блока, тип и методику смазки стального каната и др.*

*Показано, что при изгибе каната на блоке возникают относительные смещения элементов стального каната, приводящие к возникновению явления фреттинг-износа. Для возбуждения этого процесса достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Величина относительных микросмещений проволок в стальном канате зависит в первую очередь от отношения диаметра каната к диаметру блока и экспоненциально увеличивается при его уменьшении. Таким образом, малый диаметр блока является неблагоприятным фактором, и его критический размер может быть установлен, исходя из анализа полученных решений.*

**Ключевые слова:** стальной канат, долговечность, численный анализ, изгиб, блок, шкив.

### Введение

Стальной канат широко используется в современной технике, особенно в подъемно-транспортных машинах и механизмах. В качестве широко известных примеров можно привести различные краны, лебедки, лифты, шахтные подъемы, подвесные канатные дороги, вантовые мосты и многие другие машины, механизмы и сооружения, где используются стальные канаты. Особенно большое значение стальной канат играет в таких отраслях народного хозяйства, как нефте- и газодобыча, горная промышленность, рыболовство, строительство, судоходство и др.

Эксплуатация большинства стальных канатов связана с многократным изгибом на блоках, шкивах, барабанах и других устройствах. Стальной канат, несмотря на кажущуюся простоту, удивительно сложный объект для исследования. Так, на современном этапе [1–3] принято выделять следующие виды напряжений при растяжении и изгибе каната на блоке:

- растягивающие напряжения;
- изгибные напряжения;

- вторичные растягивающие напряжения (дополнительные напряжения);
- напряжения «овализации»;
- контактные напряжения (внутри каната и между канатом и блоком);
- малые напряжения кручения;
- вторичные изгибные напряжения;
- третичные изгибные напряжения.

Определение всех этих напряжений в настоящий момент имеет разную степень проработанности. Так, растягивающие и изгибные напряжения определяются достаточно точно. Что касается остальных, то существует несколько методик, имеющих свои достоинства и недостатки.

При правильном проектировании каната и грузоподъемного механизма вторичных и третичных изгибных напряжений можно избежать. Оставшиеся напряжения суммируются и получаются так называемые суммарные продольные напряжения, которые являются одним из главных факторов, определяющих долговечность стального каната при работе на блоке. На рис. 1 показан типичный график продольных напряжений в канате при движении по блоку [4].

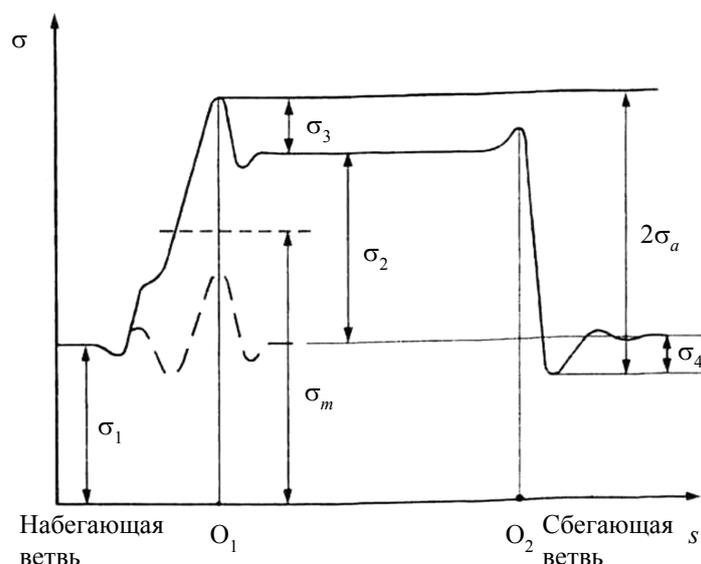


Рис. 1. Продольные напряжения в канате, проходящем по блоку

Fig. 1. Longitudinal stress in the rope passing through the block

Отчетливо видны пики продольных напряжений в точках набегания и схода каната с блока. Как и для любого случая усталостной долговечности при оценке выносливости стального каната важными параметрами является амплитуда напряжений

$$2\sigma_a = \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4, \quad (1)$$

среднее напряжение цикла

$$\sigma_m = \sigma_1 + \frac{\sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4}{2}. \quad (2)$$

Но даже если известны все эти напряжения, определение долговечности конкретного стального каната затруднительно. Частично это связано с относительными микроперемещениями элементов стальных канатов, которые вызывают износ проволок, а также с неровностями поверхностей, которые приводят к неоднородности напряжений в сечении каната. По этой причине в настоящее время для оценки долговечности стальных канатов используются испытания на разнообразных пробных машинах.

В то же время использование современных систем инженерного анализа позволяет получить расширенную информацию о работе каната при изгибе, учесть влияние коэффициента трения и дефектов проволок, определить величину микросмещений элементов канатов и т. п. Это создает предпосылки для создания теорий долговечности стальных канатов подобно другим деталям машин.

Некоторые актуальные аспекты долговечности стальных канатов, вопросы износа при раз-

личных условиях нагружения, наличия оборванных проволок, заданным поверхностным износом рассмотрены в работах [5–12].

Цель исследования – определения факторов, оказывающих существенное влияние на процесс изнашивания стальных канатов при изгибе на блоках и шкивах, с целью оценки их долговечности.

#### Долговечность стальных канатов при работе на блоках. Испытания и факторы

При работе канатов на блоках и шкивах они испытывают постоянные и переменные напряжения. Общепринято за основной параметр долговечности для канатов, работающих на блоках, принимать  $\tilde{N}$  – число циклов изгиба канатов на блоке до разрушения или достижения норм браковки. В большинстве случаев под нормами браковки имеется в виду характер и число обрывов проволок на фиксированной длине, износ, коррозия, различные дефекты (волнистость, выдавливание проволоки прядей, заломы и т. п.). Например, отечественный нормативный документ РД РОСЭК 012–97 «Канаты стальные. Контроль и нормы браковки» устанавливает браковочный показатель по числу обрывов для каната односторонней свивки ЛК-О  $6 \times 7(1+6) + 1 \times 7(1+6)$  ГОСТ 3066–80, работающего на грузоподъемном кране с группой классификации механизма МЗ, равный 1 и 2 обрывам проволок на участке длиной, равной 6 и 30 диаметрам каната соответственно. Аналогичные критерии отбраковки предусмотрены ISO 4309:2017 Cranes – Wire ropes – Care and maintenance, inspection

and discard: например, для каната конструкции 6×19 Seale с количеством проволок от 51 до 75 в наружных прядях допустимое количество видимых обрывов проволок равно 2 и 4 на длине 6 и 30 диаметров каната соответственно.

Принцип действия простейшей машины для испытаний канатов на долговечность показан на рис. 2. Испытуемый канат совершает реверсивное движение на тяговом и тестовом шкивах. Ведущий блок имеет гораздо больший диаметр, чем тестовый блок. Также возможны различные комбинации испытаний: простой изгиб, обратный изгиб, флуктуирующие растяжение и изгиб, серия изгибов и т. п.

Для обеспечения надежности и воспроизводимости результатов испытаний канатов на долговечность необходимо четко определить и соблюдать условия таких испытаний. Международная организация исследователей надежности стальных канатов OIPEEC определяет требования к таким испытаниям следующими документами: OIPEEC Recommendation no. 4 и OIPEEC Bulletin 56 (1988). В таблице приведены основные минимальные требования, определяющие испытания на долговечность при изгибе проволочных канатов в соответствии с данными рекомендациями. Этого, как правило, достаточно, чтобы испытания на различных машинах приводили к похожему результату в случае соблюдения данных требований.

Широко известен факт, что смазка значительно увеличивает долговечность стальных канатов при работе на блоках [13, 14]. Тогда используемая в процессе испытаний на долго-

вечность смазка должна быть строго определена. Как правило, в качестве смазки используется минеральное масло без добавок с вязкостью 1370-1520 мм<sup>2</sup>/с. Диаметр блока  $D$  означает расстояние между центрами изогнутого каната. Блок выполнен из стали с закаленной круглой канавкой, радиусом  $r_k = 0,53d$  (номинальный диаметр каната) и углом раскрытия канавки  $\gamma = 60^\circ$ . В процессе испытаний регистрируют количество отработанных циклов, диаметр каната, количество обрывов проволок.

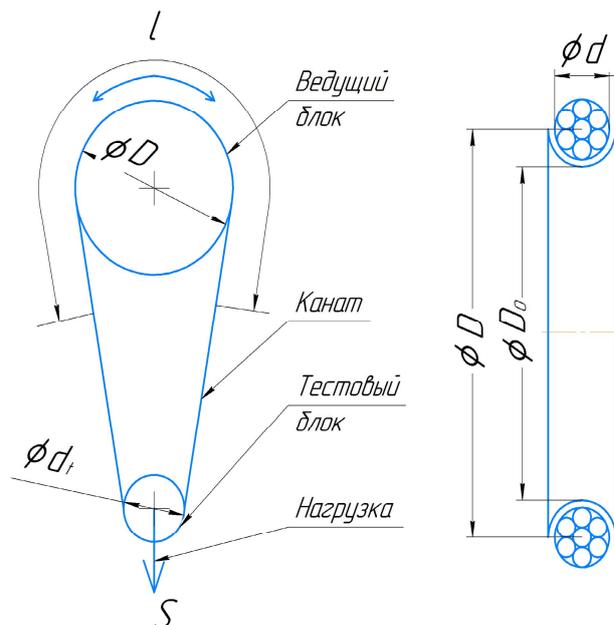


Рис. 2. К испытанию стальных канатов

Fig. 2. To the testing of steel ropes

#### Минимальные требования к испытаниям канатов на долговечность при изгибе по OIPEEC Recommendation no. 4 и OIPEEC Bulletin no. 56 (1988)

#### Minimum requirements for rope bend durability testing according to OIPEEC Recommendation no. 4 and OIPEEC Bulletin no. 56 (1988)

Спецификация	Минимальные требования
Испытаний	род изгиба (простой изгиб, обратный изгиб); растягивающая сила $S$ ; длина изгиба $lb$ ; температура каната, если больше 50 °С; угол отклонения $\alpha$ , если меньше 30 °; боковое отклонение угла $\vartheta$ , если $\vartheta \neq 0$
Испытуемого каната	конструкция каната и направление свивки; номинальный диаметр каната $d$ ; измеренный диаметр каната $d_m$ ; номинальная прочность проволоки $R_0$ ; средняя измеренная прочность проволоки $R_m$ ; минимальная сила разрыва $F_{min}$ ; измеренная сила разрыва $F_m$ ; условия смазки (тип смазки, смазка до и во время испытаний и т. п.)
Блока	диаметр блока $D$ (по оси каната) или $D_0$ (по дну канавки блока); материал блока и его твердость; форма канавки блока, радиус канавки и т. п.

Принято считать, что наиболее значимыми факторами для долговечности стального каната являются: растягивающая сила  $S$  (иначе – напряжение растяжения  $\sigma_p$ ) и отношение диаметров блока и каната  $D/d$ . На рис. 3 показаны зависимости количества циклов перегиба  $N$  каната на блоке от действующей нагрузки [15].

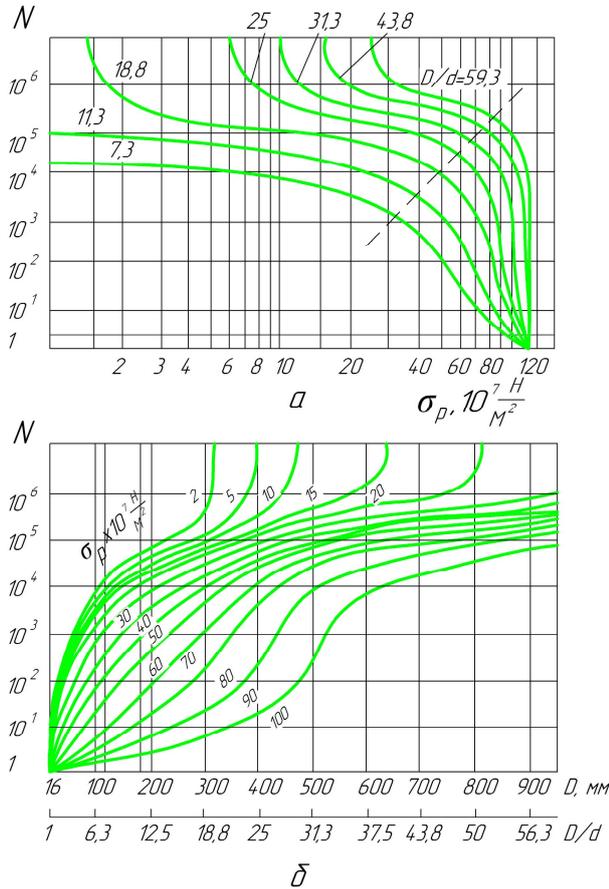


Рис. 3. Зависимость долговечности каната от среднего напряжения растяжения ( $a$ ) и диаметра блока ( $\bar{D}$ )

Fig. 3. Dependence of the rope durability on the average tensile stress ( $a$ ) and block diameter ( $\bar{D}$ )

Для канатов общепромышленного назначения ( $\sigma_p = 150 \dots 400 \text{ Н/мм}^2$ ,  $D/d = 20 \dots 30$ ) можно считать, что долговечность каната пропорциональна квадрату диаметра блока и обратно пропорциональна квадрату нагрузки. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит переход к малоцикловой усталости каната (рис. 3, область справа от пунктирной линии).

После проведения большого количества таких испытаний можно представить эту зависимость в следующем виде:

$$\lg N = a_0 + a_1 \cdot \lg \frac{S}{d^2} + a_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + a_4 \cdot \lg \frac{S}{d^2} \cdot \lg \frac{D}{d}. \quad (3)$$

Также необходимо учесть влияние на долговечность каната номинальной прочности  $R_0$  материала проволок, номинального диаметра каната  $d$  и длины пробега каната на блоке  $l$ . В результате получено следующее выражение [16]:

$$\lg N = b_0 + \left( b_1 + b_4 \cdot \lg \frac{D}{d} \right) \left( \lg \frac{S}{d^2} - 0.4 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} \right) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + b_3 \cdot \lg d + \frac{1}{b_5 + \lg \frac{l}{d}}. \quad (4)$$

Выражения для констант  $b$ :

$$b_0 = a_0 + 0,32 \cdot \lg 16 - \frac{1}{b_5 + \lg 60},$$

$$b_1 = a_1, \quad b_2 = a_2, \quad b_3 = -0,32, \quad b_4 = a_4, \quad b_5 = 1,2.$$

Для определения численных значений констант  $a, b$ , входящих в уравнения (3) и (4), необходимо провести большое количество испытаний канатов на долговечность на пробегных машинах. Например, константы для определения количества циклов до разрушения для каната конструкции Варрингтон-Сил  $8 \times 36$  с металлическим сердечником односторонней свивки имеют следующие значения:

$$b_0 = 1,381; \quad b_1 = 0,029; \quad b_2 = 6,241;$$

$$b_3 = -0,32; \quad b_4 = -1,613; \quad b_5 = 1,2.$$

Разрешив уравнение (4) относительно диаметра каната, можно получить выражение для определения его оптимального значения [17].

$$\lg d_{\text{опт}} = \frac{2a_1 b_1 + a_2}{4a_1 b_4} + \frac{b_2 + 0,32}{4b_4} - \frac{0,4}{4} \cdot \lg \frac{R_0}{1770} + \frac{\lg D}{2} + \frac{\lg S}{4}. \quad (5)$$

Заменив все константы и предел прочности материала, можно привести это выражение к следующему виду:

$$d_{\text{опт}} = c_0 \sqrt{D \sqrt{S}}. \quad (6)$$

Таким образом, к существенным факторам, определяющим долговечность стального каната при работе на блоках, относятся:

1. Действующая нагрузка  $S$ .
2. Отношение диаметров блока и каната  $\frac{D}{d}$ .
3. Предел прочности материала проволок  $R_0$ .
4. Диаметр каната  $d$ .
5. Длина пробега каната по блоку  $l$ .

В настоящее время задача оценки долговечности стальных канатов решается во многом эмпирическими методами. При этом только часть определяющих параметров нашли свое отражение в зависимости (4).

#### Явления фреттинг-износа при изгибе канатов

Фреттинг – это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей в результате малых относительных перемещений. Для возбуждения этого процесса достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали. Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате чего возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл [18].

В работе [19] показано, что стальной проволочный канат невозможно рассчитывать, следуя гипотезе плоских сечений, которая принята в теории сопротивления материалов при изучении изгиба сплошных брусев. Винтовые элементы каната – проволоки или пряди – при его изгибе получают неодинаковые осевые смещения: плоские до изгиба поперечные сечения каната деформируются.

Например, при изгибе каната по окружности радиуса  $R$  имеем свободную депланацию:

$$\eta = A \left\{ \cos[\varphi(0) + \omega x] - \cos[\varphi(0)] \right\},$$

где

$$A = \frac{r^2 \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha}. \quad (7)$$

Здесь  $r$  – радиус спирали винтовых элементов каната;  $R$  – радиус блока;  $\alpha$  – угол свивки проволок каната;  $x$  – расстояние от начала отсчета до рассматриваемого сечения;  $\varphi(0)$  – угол свивки каната в начальном сечении при  $x = 0$ ;

$$\omega = \frac{2\pi}{h}, \quad h \text{ – шаг свивки проволок.}$$

Для сечений при  $x$ , кратном нечетному числу полушагов свивки

$$x = \frac{2n+1}{\omega} \pi = \frac{2n+1}{2} h, \quad (8)$$

депланация будет максимальной:

$$\eta_{\max} = -2A \cos[\varphi(0)]. \quad (9)$$

При параметрах максимальные депланации поперечного сечения каната  $r = 0,201 \cdot 10^{-3}$  м,  $\alpha = \arctan(0,19951)$ ,  $R = 0,25$  м

$$\eta_{\max} = -1,59 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

В работах [20–22] авторами проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния канатов при изгибе на блоках методом конечных элементов. Среди прочего были определены микросмещения взаимно контактирующих проволок стального каната. Полученные результаты согласуются с решением (7).

Зависимость максимальных депланаций от диаметра блока приведена на рис. 4.

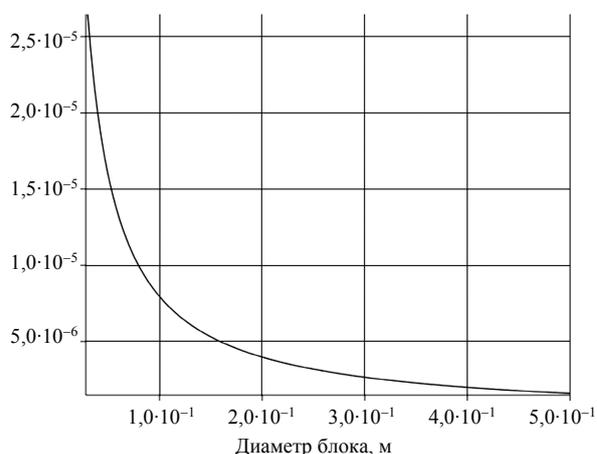


Рис. 4. Зависимость максимальных депланаций от диаметра блока

Fig. 4. Dependence of maximum depplanation on block diameter

Хорошо видно, что с ростом диаметра блока их величина уменьшается. При этом также будут уменьшаться взаимные относительные микросмещения, вызванные разницей депланаций контактирующих проволок каната. Как следствие, снизится износ материала каната и вырастет долговечность, что подтверждается многочисленными опытами. При этом область излома на графике, соответствующая диаметрам блока  $1,5 \dots 2 \cdot 10^{-1}$  м, обозначает переход к более плавному изменению величины депланации для системы «канат – блок». Таким образом, малый диаметр блока является неблагоприятным фактором, и его критический размер может быть установлен, исходя из анализа графика, изображенного на рис. 4.

Процесс разрушения проволок стальных круглопрядных канатов при приложении осевой циклической нагрузки, имитирующей вибростояние каната при его эксплуатации на шахтных подъемных установках, показан в работе [23]. Описан проведенный эксперимент, выделены области и типы контактного взаимодействия между проволоками и приведены зависимости скорости разрушения каната, сделанного из проволок разных маркировочных групп, от числа циклов нагружения. Отдельно проанализирован разрыв проволоки и установлена причина быстрого разрушения каната. В результате проведенного эксперимента были установлены зависимости величины разрушения проволок каната, изготовленных из стали различных маркировочных групп, от числа циклов осевого нагружения. Определено, что наибольшая скорость разрушения каната при таком виде нагружения у каната, изготовленного из проволок с временным сопротивлением на разрыв 2800 МПа. Так, скорость образования

области разрушения при линейном контакте между проволоками составила  $0,64 \text{ мкм}/10^3$  циклов нагружения; при точечном контакте прядей с сердечником объемное разрушение происходило со скоростью  $37,67 \cdot 10^{-6} \text{ мм}/10^3$  циклов, что значительно больше, чем скорость разрушения каната из проволок маркировочных групп 1960 и 2800 МПа. Максимальная глубина разрушения проволоки была обнаружена в зоне точечного контакта между прядями (46 мкм), также на самых прочных проволоках, из чего можно сделать вывод, что этот тип контакта является наиболее опасным.

На рис. 5 показаны графики зависимостей глубины разрушения в местах контакта проволок стального каната от числа циклов нагружения [24]. Хорошо видно, что с ростом числа циклов все образцы изнашиваются сильнее, однако применение смазочных материалов позволяет существенно замедлить данный процесс. Особенно эффективны специализированные смазки с антифреттинговыми присадки.

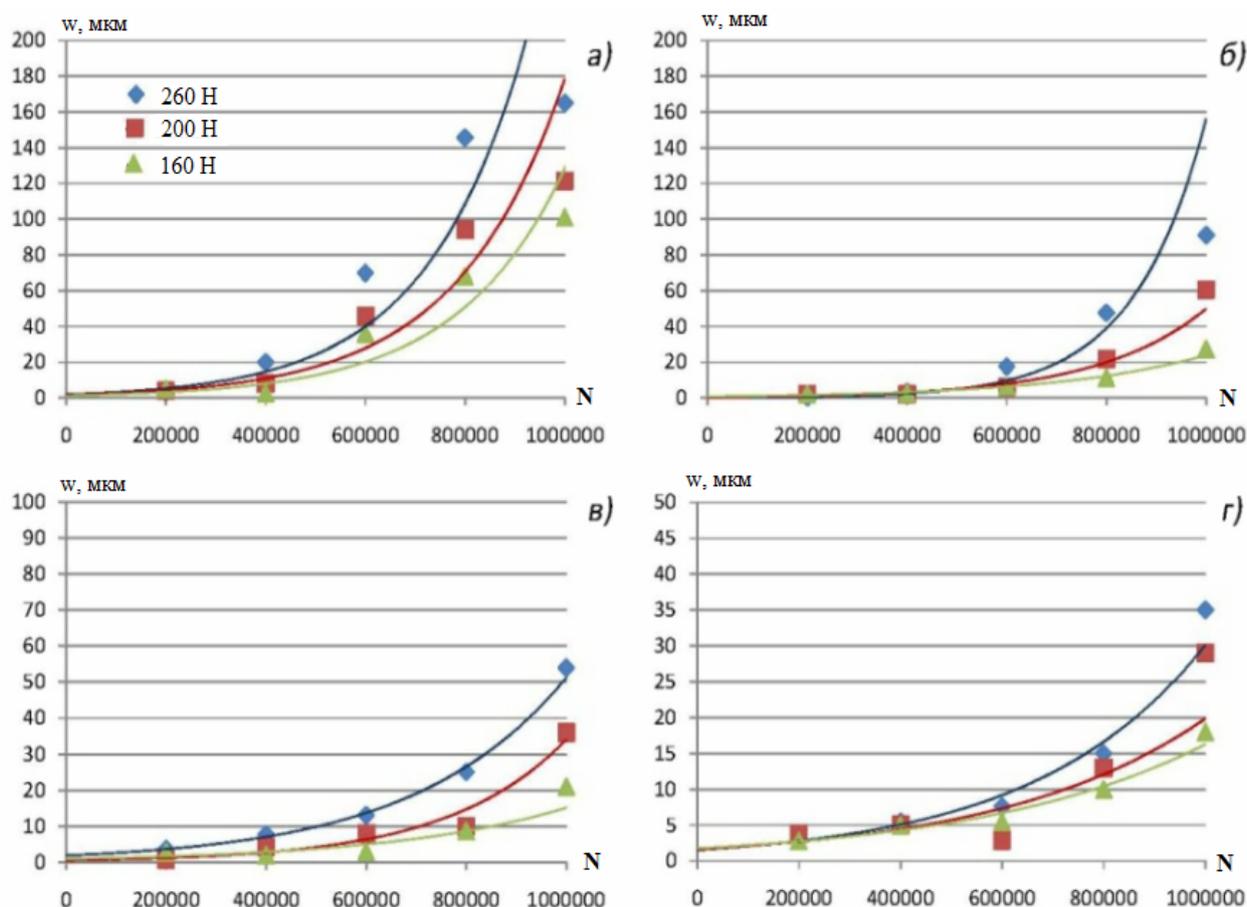


Рис. 5. Графики зависимости глубины износа  $w$  при различной нормальной силе  $P$  (160 Н, 200 Н, 260 Н) от числа циклов нагружения  $N$ : а – контакт без смазки; б – смазка № 1; в – смазка № 2; г – смазка № 3

Fig. 5. Plots of the depth of wear at various normal forces (160 N, 200 N, 260 N) versus the number of loading cycles: а - contact without lubrication; б - grease number 1; в - grease number 2; г - grease number 3

### Выводы

В работе показаны виды механических напряжений, возникающих при эксплуатации стальных канатов, приведены важнейшие факторы, влияющие на их износ и основные параметры фреттинга, возникающего вследствие изгиба каната. В целом картина напряженно-деформированного состояния при эксплуатации стальных канатов имеет довольно сложный характер, что является одной из основных причин трудности построения детерминированной теории долговечности стальных канатов. И в настоящее время задача оценки долговечности стальных канатов решается во многом эмпирическими методами.

В простых случаях продольные и изгибные напряжения с достаточной степенью точности могут быть определены аналитическими методами. Полную же картину напряженно-деформированного состояния, а также основные параметры фреттинг-износа (контактные давления, дистанции и скорости скольжения) и их зависимость от коэффициента трения возможно оценить с использованием инженерных систем численного анализа. В то же время моделирование процесса изнашивания напрямую сопряжено с определенными сложностями и в этом случае необходима экспериментальная оценка процессов трения и изнашивания в стальном канате, с учетом используемых смазочных материалов, условий эксплуатации, таких как температура и влажность, наличие коррозионно-активной среды и т. д.

Таким образом, построение адекватной модели износа возможно при сочетании аналитических методов и численного анализа с одной стороны и различных моделей фреттинга с экспериментальными данными – с другой. Это позволяет определить зависимости износа и скорости разрушения от количества циклов нагружения каната, что, в свою очередь, позволит спрогнозировать развитие критических повреждений в элементах стальных канатов и обеспечить ее нормирование при заданных условиях эксплуатации.

### Библиографические ссылки

1. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.
2. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 1: Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования. Одесса: Астропринт, 2001. 188 с.
3. Feyrer K. Wire Ropes Under Bending and Tensile Stresses. *Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability*.

Berlin, Heidelberg: *Springer Berlin Heidelberg*, 2015, pp. 179-330.

4. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 2: Основы теории изгиба и взаимодействия с опорной поверхностью. Одесса: Астропринт, 2002. 180 с.

5. Ma W., Lubrecht A.A. Detailed contact pressure between wire rope and friction lining. *Tribol. Int. Elsevier*, 2017, vol. 109, pp. 238-245.

6. Chang X.-D. Experimental investigation of mechanical response and fracture failure behavior of wire rope with different given surface wear. *Tribol. Int. Elsevier*, 2018, vol. 119, pp. 208-221.

7. Peng Y. The friction and wear properties of steel wire rope sliding against itself under impact load. *Wear. Elsevier*, 2018, vol. 400-401, pp. 194-206.

8. Zhang D. Effect of broken wire on bending fatigue characteristics of wire ropes. *Int. J. Fatigue. Elsevier*, 2017, vol. 103, pp. 456-465.

9. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

10. Yu-xing P. Sliding friction and wear behavior of winding hoisting rope in ultra-deep coal mine under different conditions. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369, pp. 423-434.

11. Xiang L. Elastic-plastic modeling of metallic strands and wire ropes under axial tension and torsion loads. *Int. J. Solids Struct. Pergamon*, 2017, vol. 129, pp. 103118.

12. Cao X., Wu W. The establishment of a mechanics model of multi-strand wire rope subjected to bending load with finite element simulation and experimental verification. *Int. J. Mech. Sci. Pergamon*, 2018, vol. 142143, pp. 289-303.

13. К методике выбора смазочного материала при трении стального каната / В. В. Тарасов [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. Т. 2. С. 164-168.

14. Повышение эффективности использования стальных канатов путем совершенствования состава смазочного материала / В. Н. Новиков и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109, № 1. С. 98-101.

15. Müller H. Das Verhalten der Drahtseile bei Wechselbeanspruchung. *Draht-Welt*, 1961, vol. 47, p. 193.

16. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

17. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

18. Талтыкин В. С. Обоснование метода повышения долговечности шахтных канатов с учетом контактного взаимодействия проволок / Московский государственный горный университет, 2009. 132 с.

19. Глушко М. Ф. Деформация поперечных сечений и напряжения в канатах при изгибе // Стальные канаты, 1967, № 4. С. 65-75.

20. Калентьев Е. А., Тарасов В. В., Пузанов Ю. В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния каната при его работе на блоке // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3. С. 33–37.

21. Калентьев Е. А. Изгибные напряжения в канатах при огибании блоков // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 1. С. 29–33.

22. Kalentev E. Numerical analysis of the stress-strain state of a rope strand with linear contact under tension and torsion loading conditions. *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 231-239.

23. Островский М. С., Талтыкин В. С. Исследование процесса разрушения проволок круглопрядного каната при приложении циклической осевой нагрузки // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 1. С. 23–27.

24. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

### References

1. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

2. Malinovskii V.A. *Nekotorye voprosy tekhnologii, rascheta i proektirovaniya* [Some issues of technology, calculation and design]. Odessa, Astroprint Publ., 2001, 188 p. (in Russ.).

3. Feyrer K. Wire Ropes Under Bending and Tensile Stresses. Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 179-330.

4. Malinovskii V.A. *Osnovy teorii izgiba i vzaimodeistviya s opornoj poverkhnost'yu* [Fundamentals of the theory of bending and interaction with the supporting surface]. Odessa, Astroprint Publ., 2002, 180 p. (in Russ.).

5. Ma W., Lubrecht A.A. Detailed contact pressure between wire rope and friction lining. *Tribol. Int. Elsevier*, 2017, vol. 109, pp. 238-245.

6. Chang X.-D. Experimental investigation of mechanical response and fracture failure behavior of wire rope with different given surface wear. *Tribol. Int. Elsevier*, 2018, vol. 119, pp. 208-221.

7. Peng Y. The friction and wear properties of steel wire rope sliding against itself under impact load. *Wear. Elsevier*, 2018, vol. 400-401, pp. 194-206.

8. Zhang D. Effect of broken wire on bending fatigue characteristics of wire ropes. *Int. J. Fatigue. Elsevier*, 2017, vol. 103, pp. 456-465.

9. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

10. Yu-xing P. Sliding friction and wear behavior of winding hoisting rope in ultra-deep coal mine under different conditions. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369, pp. 423-434.

11. Xiang L. Elastic-plastic modeling of metallic strands and wire ropes under axial tension and torsion loads. *Int. J. Solids Struct. Pergamon*, 2017, vol. 129, pp. 103118.

12. Cao X., Wu W. The establishment of a mechanics model of multi-strand wire rope subjected to bending load with finite element simulation and experimental verification. *Int. J. Mech. Sci. Pergamon*, 2018, vol. 142143, pp. 289-303.

13. Tarasov V.V. [Towards a Method of Lubricant Selection for Steel Friction the rope]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 2, pp. 164-168 (in Russ.).

14. Novikov V.N. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya stal'nykh kanatov putem sovershenstvovaniya sostava smazochnogo materiala* [Improving the efficiency of using steel cables by improving the composition of the lubricant]. *Trudy GOSNITI*, 2012, vol. 109, pp. 98-101 (in Russ.).

15. Müller H. Das Verhalten der Drahtseile bei Wechselbeanspruchung. *Draht-Welt*, 1961, vol. 47, p. 193.

16. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

17. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

18. Taltykin V.S. *Obosnovanie metoda povysheniya dolgovechnosti shakhtnykh kanatov s uchetom kontaktного vzaimodeistviya provolok* [Substantiation of the method of increasing the durability of mine ropes taking into account the contact interaction of wires]: PhD thesis. Moscow, State Mining University, 2009, 132 p. (in Russ.).

19. Glushko M.F. *Deplanatsiya poperechnykh sechenii i napryazheniya v kanatakh pri izgibe* [Deplanation of cross sections and stresses in ropes during bending]. *Stal'nye kanaty*, 1967, no. 4, pp. 65-75 (in Russ.).

20. Kalentev E.A., Tarasov V.V., Puzanov Yu.V. [Numerical analysis of the stress-strain state of the rope during its work on the block]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, vol. 3, pp. 33-37 (in Russ.).

21. Kalentev E.A. [Bending stresses in the rope when rounding blocks]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2017, no. 1, pp. 29–33 (in Russ.).

22. Kalentev E. Numerical analysis of the stress-strain state of a rope strand with linear contact under tension and torsion loading conditions. *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 231-239.

23. Ostrovsky M.S., Taltykin V.S. [Investigation of the process of destruction of the wires of a circular-spun rope under the application of cyclic axial load]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2009, no. 1, pp. 23-27 (in Russ.).

24. Chen Y., Meng F., Gong X. Interwire wear and its influence on contact behavior of wire rope strand subjected to cyclic bending load. *Wear. Elsevier*, 2016, vol. 368-369. pp. 470-484.

### To the Question of Steel Ropes Durability

*E.A. Kalentiev*, PhD in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

*V.V. Tarasov*, DSc in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

*V.N. Novikov*, Post-graduate, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

*The paper discusses some aspects of the assessment of the durability of steel ropes operating on blocks, taking into account the contact interaction of wires. Types of stresses arising from operation of steel ropes are described. The basic information on steel ropes testing for durability in bending is given. To determine the durability of steel ropes operating on blocks, empirical dependences are presented that take into account many factors: the actual load, the ratio of diameters of the rope and the block, the tensile strength of the wire material, the diameter of the rope, the length of the rope run on the block, the type of the core, the shape of the block groove, the type of steel rope lubricants and others. It has been shown that relative bending of steel rope elements occurs during bending of the rope on the block, leading to the appearance of fretting wear. To excite this process, displacement of surfaces with an amplitude of  $0.025 \mu\text{m}$  is sufficient. The magnitude of the relative micro wire displacements in a steel cable depends primarily on the ratio of the rope diameter to the block diameter and increases exponentially with its decrease. Thus, the small diameter of the block is an unfavorable factor and its critical size can be established basing on the analysis of the solutions obtained.*

**Keywords:** wire rope, numerical analysis, bending, block, pulley.

Получено 21.01.2019

#### Образец цитирования

*Калентьев Е. А., Тарасов В. В., Новиков В. Н.* К вопросу о долговечности стальных канатов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 20–28. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-20-28.

#### For Citation

*Kalentiev E.A., Tarasov V.V., Novikov V.N.* [On the issue of durability of steel ropes]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 20-28 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-20-28.