

УДК (UDC) 621.778.1

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УСКОРЕННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ
КАНАТНОЙ ПРОВОЛОКИ

THE METHOD OF ACCELERATED FATIGUE TESTING OF CABLE WIRE

Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Хальфин М.Н., Егельская Е.В., Каланчуков И.А.
Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Khalfin M.N., Egelskaya E.V., Kalanchukov I.A.Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Аннотация. Одним из технологических факторов, влияющих на долговечность стальных канатов, является качество канатной проволоки. Основным критерием качества и однородности металла канатной проволоки служат механические испытания (на разрыв по ГОСТ 10446, на перегиб по ГОСТ 1579 и скручивание по ГОСТ 1545). Однако традиционные испытания на перегиб и скручивание, когда материал образца проволоки подвергается периодическому растяжению и сжатию в зоне пластических деформаций, не могут полностью характеризовать качество металла. Основными критериями браковки канатов считаются браковочные показатели по обрывам проволоки, которые являются следствием усталостного разрушения, представляющего собой процесс, состоящий из двух фаз – образования макротрещины, а затем ее развития до полного разрушения образца. Для оценки качества материала канатной проволоки достаточно фиксировать момент образования макротрещины. Одним из способов, реализующих этот принцип, является испытание образца в условиях резонансного режима. Для совершенствования контроля качества канатной проволоки предлагается стандартные механические испытания по ГОСТ 3241 дополнить проведением ускоренных усталостных испытаний канатной проволоки, предложена конструкция установки, основанная на резонансном режиме, и методика проведения этих испытаний.

Ключевые слова: канатная проволока, оценка качества, усталостное разрушение, установка для испытаний, амплитуда колебаний.

Дата принятия к публикации: 12.05.2019
Дата публикации: 25.06.2019

Сведения об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: korot@novoch.ru
ORCID: 0000-0001-9446-4911

Иванов Борис Фёдорович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический универси-

Abstract. One of the factors of technological order, affecting the durability of steel ropes, is the quality of the wire rope. The main criterion for the quality and uniformity of the metal cable wire are mechanical tests (for rupture according to GOST 10446, bending according to GOST 1579 and twisting according to GOST 1545). However, traditional bending and twisting tests, where the material of the wire specimen is subjected to periodic stretching and compression in the plastic deformation zone, cannot fully characterize the quality of the metal. The main criteria for the rejection of ropes are considered defective indicators on wire breaks, which are the result of fatigue failure, which is a process consisting of two phases – the formation of a macrofracture, and then its development until the complete destruction of the sample. To assess the quality of the wire rope material is enough to fix the moment of formation of macro-cracks. One way to implement this principle is to test the sample under resonant conditions. To improve the quality control of the wire rope is offered standard mechanical tests in accordance with GOST 3241 to complement the accelerated fatigue tests of the wire rope, the proposed design of the installation, based on the resonance mode, and the method of these tests.

Keywords: cable wire, quality assessment, fatigue failure, test rig, oscillation amplitude.

Date of acceptance for publication: 12.05.2019
Date of publication: 25.06.2019

Authors' information:

Anatoliy A. Korotkiy - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Transport systems and logistics" at Don State Technical University, e-mail: korot@novoch.ru
ORCID: 0000-0001-9446-4911

Boris F. Ivanov - Candidate of Technical Sciences, docent, Professor of the Department "Transport systems and logistics" at Don State Technical University, e-mail: ivanov@ikc-mysl.ru

тет», *e-mail: ivanov@ikc-mysl.ru*

Хальфин Марат Нурмухамедович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», *e-mail: xalfin@km.ru*

Егельская Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», *e-mail: egelskaya72@mail.ru*

ORCID: 0000-0003-3864-9254

Каланчук Ильяс Александрович – студент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
e-mail: ilyaskalanchukov@gmail.com

Marat N. Khalfin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department “Transport systems and logistics” at Don State Technical University, *e-mail: xalfin@km.ru*

Elena V. Egelskaya - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Transport systems and logistics” at Don State Technical University, *e-mail: egelskaya72@mail.ru*
ORCID: 0000-0003-3864-9254

Ilyas A. Kalanchukov – student of the Department “Transport systems and logistics” at Don State Technical University, *e-mail: ilyaskalanchukov@gmail.com*

1. Введение

Современный научно-технический уровень развития подъемных сооружений и пассажирских канатных дорог предъявляет все более жесткие требования к повышению надежности и качества стальных канатов, способствуя осуществлению бесперебойной работы указанных технических устройств и безопасности персонала и пассажиров. Важное значение в повышении долговечности канатов играет разработка новых прогрессивных конструкций канатов, применение новых технологий изготовления, выбор рациональных конструкций канатов с учетом особенностей эксплуатации подъемных сооружений и подвесных канатных дорог [1-5], а также изготовление канатов из качественной канатной проволоки. В связи с последним повышается роль контроля качества материала проволоки.

Канатная проволока должна обладать максимально возможной прочностью при высоких пластических свойствах, стойкостью против истирания и расплющивания, выдерживать сложные условия работы в канате, подвергаясь статическим, динамическим и знакопеременным нагрузкам. Для изготовления проволок применяют углеродистые стали марок от Ст45 до Ст85.

Качество металла проволоки в определенной степени зависит от его химического состава и металлографической структуры образцов. Так, с увеличением содержания углерода в металле на 10%, использованием

эффектов волочения и термообработки проволоки при изготовлении, предел прочности ее повышается на 100...150 МПа. Марганец повышает износостойкость проволоки и несколько увеличивает ее прочность. Металлографический анализ образцов канатной проволоки определяет состав и структуру металла, ориентацию его зерен, наличие неметаллических включений.

Очевидно, что результаты химического и металлографического анализов не являются определяющими при контроле качества проволоки, но могут использоваться при необходимости комплексного исследования свойств проволоки.

2. Описание установки для ускоренных усталостных испытаний канатной проволоки

Важными критериями при оценке качества канатной проволоки считаются результаты механических испытаний. Оценка механических свойств проволоки производится согласно ГОСТ 3241 [6] и ГОСТ 7372 [7], которыми устанавливаются требования к испытываемым образцам проволоки и порядок проведения испытаний. Образцы канатной проволоки испытываются на растяжение (ГОСТ 10446), скручивание (ГОСТ 1545) и перегиб (ГОСТ 1579).

Необходимо отметить, что традиционные испытания на перегиб и скручивание, когда материал образца подвергается периодическому растяжению и сжатию в зоне пласти-

ческих деформаций, не соответствуют нагрузженности канатной проволоки в процессе эксплуатации и поэтому не могут достоверно оценить качество материала. Анализ дефектов канатов, используемых на подъемных сооружениях и канатных дорогах [8, 9] показал, что основным критерием выхода их из строя являются браковочные показатели по обрывам проволоки, являющихся, в основном, следствием усталостного разрушения металла проволок, которое представляет собой процесс, состоящий из образования макротрещины (протяженностью до 1 мм), а затем ее дальнейшее развитие до разрушения образца. Для оценки качества материала канатной проволоки важно при проведении испытаний определить момент образования макротрещины. Одним из способов, позволяющих зафиксировать этот момент, является испытание проволоки в условиях резонансного режима, когда возникновение трещины обнаруживается по уменьшению частоты собственных колебаний образца.

Нами предложена конструкция установки для ускоренных усталостных испытаний канатной проволоки, использующая резонансный эффект с возможностью изменения амплитуды колебаний образца, соответствующей деформациям проволоки при изгибе каната на блоках, шкивах канатных дорог, барабанах механизмов подъема грузоподъемных кранов (рис. 1).

Принцип действия установки заключается в том, что на соленоиды 1 подается ток промышленной частоты с регулируемым напряжением, электромагниты поочередно подключаются к сети с помощью диодов при частоте колебаний 50 Гц. Установка позволяет настроить систему на резонансный режим колебаний при симметричном изгибе проволоки 2, который достигается изменением длины консоли образца. Амплитуда колебаний регулируется автотрансформатором. Момент появления макротрещины (первая фаза усталостного разрушения) характеризуется резким падением амплитуды колебаний, регистрируемой оптическим датчиком. Полное разрушение образца достигается увеличением электромагнитного поля с помощью автотрансформатора.

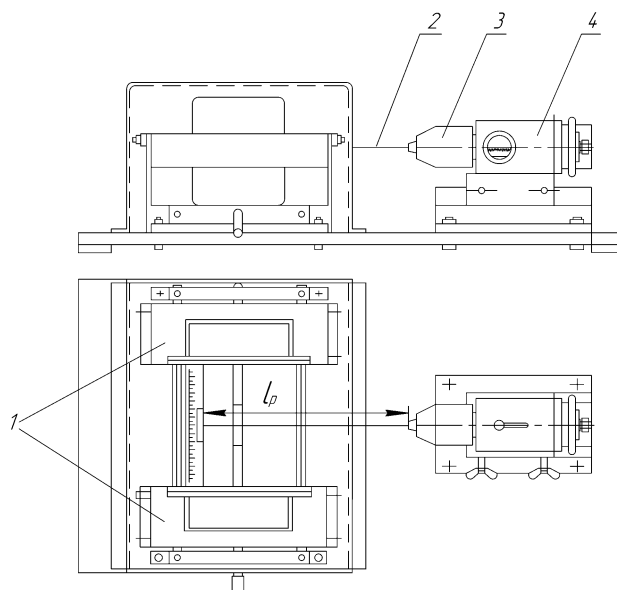


Рис. 1. Конструкция установки для ускоренных усталостных испытаний канатной проволоки:

- 1 – соленоиды; 2 – образец канатной проволоки; 3 – цанговый захват; 4 – зажимное устройство

Регулирование процесса испытаний осуществляется с помощью пульта управления, содержащего тумблеры включения-выключения установки, лампочки режимов, автотрансформатор, амперметр, вольтметр, электронный секундомер, оптический датчик.

Зависимость между величиной изгибных напряжений и заданной величиной амплитуды колебаний определена в [10]:

$$\sigma_v = 4E \frac{f\delta}{[\delta^2(1+\mu) - 2,67 l_p^2]}, \quad (1)$$

где δ – диаметр образца проволоки, мм; E – модуль упругости, МПа; μ – коэффициент Пуассона; l_p – «резонансная» длина образца (расстояние от зажима до конца консоли):

$$l_p = 115,4\sqrt{\delta}. \quad (2)$$

При необходимости расчета амплитуды колебания выражение (1) легко преобразуется к виду

$$f = \frac{0,67 \varepsilon l_p}{\delta} \quad (3)$$

где ε – относительная деформация образца.

Очевидно, что усталостные испытания канатной проволоки целесообразно проводить при упругих деформациях образцов,

соответствующих работе проволоки в каналах, эксплуатирующихся на подъемных сооружениях, лифтах и пассажирских канатных дорогах, то есть от $\varepsilon = 0,001$ до $\varepsilon = 0,006$, что обеспечивает величину изгибных напряжений от 200 до 1100 МПа.

Минимальное число ступеней нагружения образца, необходимое для построения усталостной кривой определится выражением

$$N_{\min} = t \frac{k_{\text{вар}}}{k_{\text{доп}}}, \quad (4)$$

где t – нормированное отклонение ($t = 1,65$ при уровне надежности испытаний, равном 0,9); $k_{\text{доп}}$ – допустимая ошибка ($k_{\text{доп}} = 0,1$); $k_{\text{вар}}$ – коэффициент вариации (принят равным 0,15).

Подставив в формулу (4) значения статистических величин, получим $N_{\min} = 6$.

3. Результаты и их анализ

На рис. 2 представлены результаты усталостных испытаний канатной проволоки диаметром 2,2 мм на симметричный изгиб (N – число циклов нагружения). В процессе испытаний различных образцов канатной проволоки было установлено, что длительность проведения испытаний одного образца диаметром от 1 до 4 мм при амплитуде колебаний от 10 до 150 мм и резонансной длине от 150 до 300 мм составляет от 1 до 8 минут, что позволяет рекомендовать установку для производственных условий.

Предлагаемая методика проведения испытаний канатной проволоки включает следующие операции:

1. Отбор образцов проволок для традиционных механических испытаний и испытаний на усталость. Для проверки соответствия механических свойств проволок вырезается отрезок каната длиной не менее 2,0 м. От этого отрезка каната отбираются проволоки в количестве, указанном в табл.

2. Отобранные проволоки осматриваются, выпрямляются, производится измерение диаметра каждой проволоки, вешается бирка с ее номером и образец передается на соответствующие испытания.

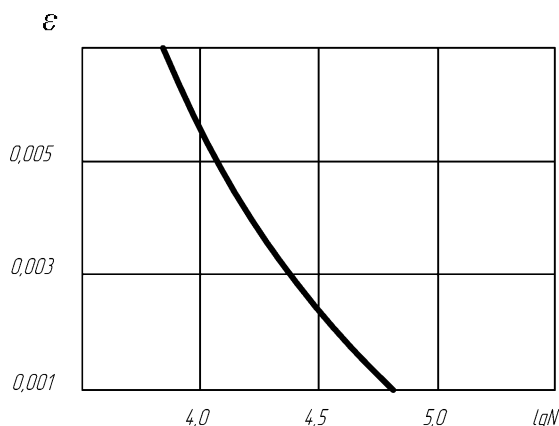


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний канатной проволоки диаметром 2,2 мм на симметричный изгиб.

3. Проводятся механические испытания и выполняется обработка их результатов согласно требованиям ГОСТ 3241.

4. До начала усталостных испытаний для каждого диаметра образцов рассчитывается «резонансная» длина l_{pi} согласно выражения (2) и амплитуды колебаний f_i , исходя из заданных значений относительной деформации ($\varepsilon_i = 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005$ и $0,006$) с использованием формулы (3).

5. На каждом из шести уровней нагружения проводятся испытания не менее 5 образцов одинакового диаметра.

6. Выполняется статистическая обработка результатов усталостных испытаний аналогично ГОСТ 3241 (для каждого типоразмера образца определяется среднее значение числа циклов до образования макротрещины, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации).

7. Результаты испытаний заносятся в таблицу и для каждого типоразмера проволоки строятся графики $\varepsilon - \lg N$.

8. Проводится анализ полученных результатов и делаются выводы о соответствии канатной проволоки критериям усталостной прочности и требованиям ГОСТ 3241.

Указанный метод проведения ускоренных испытаний может использоваться для оценки качества как круглой, так и фасонной канатной проволоки.

4. Заключение

Результаты, полученные согласно предложенной методике испытаний проволоки канатов, эксплуатирующихся на подъемных сооружениях и подвесных канатных дорогах, подтвердили недостаточность проведения механических испытаний на растяжение, изгиб и скручивание. В ряде случаев при удовлетворительных значениях показателей образцов на перегиб и скручивание результаты усталостных испытаний этих образцов оказывались ниже допустимых, что вполне мо-

жет привести к образованию дефектов в процессе эксплуатации канатов.

В связи с этим для объективной оценки качества канатной проволоки предлагается:

- стандартные механические испытания по ГОСТ 3241 дополнить проведением ускоренных усталостных испытаний;
- конструкция установки для проведения ускоренных усталостных испытаний канатной проволоки на симметричный изгиб;
- методика проведения ускоренных усталостных испытаний.

Таблица

Количество проволок каната для механических испытаний и испытаний на усталость

Вид испытания	Количество испытываемых проволок	
	в грузоподъемном канате	в грузовом канате
На растяжение	100 % проволок	25 % проволок
На перегиб	100 % проволок	25 % проволок
На скручивание	25 % проволок	10 % проволок
На усталость	100 % проволок	25 % проволок

Список литературы

1. Короткий, А.А. Пассажи́рские канатные доро́ги. Эффективность и безопасность при эксплуатации / А.А. Короткий, В.В. Гущин, К.М. Иванов. – Ростов н/Д, 2009. – 120 с.
2. Короткий, А.А. Метод оценки подъемных канатов / А.А. Короткий, М.Н. Хальфин, Б.Ф. Иванов, Е.В. Харьковский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 6. – с. 428-434.
3. Хальфин, М.Н. Крановые канаты / М.Н. Хальфин, А.А. Короткий, Б.Ф. Иванов, В.П. Папирняк. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова, 2015. – 127 с.
4. Хальфин, М.Н. Расчет и браковка крановых канатов с металлическим сердечником с учетом воздействия высоких температур / М.Н. Хальфин, А.А. Короткий, Б.Ф. Иванов, В.Б. Маслов. – Новочеркасск: Юж-

References

1. Korotkiy A.A., Guschcin V.V., Ivanov K.M. *Passazhirskie kanatnye dorogi. Effektivnost i bezopasnost pri ekspluatatsii* [Passenger cable cars. Operational efficiency and safety]. Rostov-on-Don, 2009. 120 p. (In Russian)
2. Korotkiy A.A., Khalfin M.N., Ivanov B.F., Kharkovskiy E.V. Estimation method of hoisting ropes. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, No. 6, pp. 428-434. (In Russian)
3. Khalfin M.N., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Papirnyak V.P. *Kranovye kanaty* [Crane ropes]. Novocherkassk, Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet (NPI) imeni M.I. Platova, 2015. 127 p. (In Russian)
4. Khalfin M.N., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Maslov V.B. *Raschet i brakovka kranovykh kanatov s metallicheskim serdechnikom s uchetom vozdeystviya vysokikh temperatur* [Calculation and rejection of crane ropes with metal core taking into account the impact of

но-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова, 2009. – 106 с.

5. Хальфин, М.Н. Повышение стойкости несущих канатов при эксплуатации на подвесных канатных дорогах / М.Н. Хальфин, Е.В. Сорокина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 12. – 4.2. – С. 337-343.

6. ГОСТ 3241-91. Канаты стальные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3). – Взамен ГОСТ 3241-80; введ. 1993-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 23 с.

7. ГОСТ 7372-79. Проволока стальная канатная. Технические условия (с Изменениями № 1-4). – Введ. 1982-01-01. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 35 с.

8. ФНП «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». Серия 10. Выпуск 81. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2017. – 164 с.

9. ФНП «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров». Серия 10. Выпуск 84. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – 156 с.

10. Иванов, Б.Ф. Об ускоренных испытаниях канатной проволоки / Б.Ф. Иванов, М.Н. Хальфин, А.С. Логвинов, Д.В. Власов // Подъемно-транспортные и строительные системы: наука и инновации: межвуз. сборник научн. тр. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова. – Новочеркасск: Лик, 2015. – С. 101-105.

high temperatures]. Novocherkassk, Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiiy universitet (NPI) imeni M.I. Platova, 2009. 106 p. (In Russian)

5. Khalfin M.N., Sorokina E.V. To the question of increase of firmness of bearing ropes at operation on suspended ropeways. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, No. 12, pp. 337-343. (In Russian)

6. GOST 3241-91. *Steel Ropes. Specifications*. Moscow, Standartinform, 2008. 23 p. (In Russian).

7. GOST 7372. *Steel wire ropes. Specifications*. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2003. 35 p. (In Russian)

8. FNP “*Safety regulations for hazardous production facilities that use lifting equipment*”. Moscow, ZAO “Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti”, 2017. 164 p. (In Russian)

9. FNP “*Safety rules for passenger cable cars and funiculars*”. Moscow, ZAO “Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti”, 2016. 156 p. (In Russian)

10. Ivanov B.F., Khalfin M.N., Logvinov A.S., Vlasov D.V. About the accelerated testing of the cable wire. *Podyemno-transportnye i stroitelnye sistemy: nauka i innovatsii; mezhevuzovskiy sbornik. Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiiy universitet (NPI) imeni M.I. Platova*. Novocherkassk, Lik, 2015, pp. 101-105. (In Russian)