

Stand resource tests of steel ropes

A. N. Abramov, V. Yu. Sholom[†], O. L. Kramer, V. P. Golovin

[†]rosoil@rosoil.ru

Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450008, Russia
“Technopark KhT’Ts UAI-ROSOIL”, Naberezhnaya St., 122, Ufa, 450057, Russia

The method of accelerated bench test of rope endurance in accordance with GOST 2387-80 “Steel ropes. Endurance test method” with periodic exposure to a corrosive environment was performed. The main goal of accelerated testing is to obtain information about the endurance of the rope during the test time, less than the specified resource of its operation. The study of steel wire ropes according to the proposed method was carried out on a running machine designed and manufactured at the Technological Park “KhT’Ts UAI-ROSOIL”. The machine provides periodic dipping of the deformable section of the rope in a corrosive environment during reciprocating movement and repeated alternating bending of the sample by 90°. For testing, samples of a steel rope with a diameter of 5.6 mm without coating of two types: according to GOST 14954-80 (I type, with a metal core) and GOST 2688-80 (II type, with a core of organic material) were used. The influence of the lubricant in this work was not considered. The cores, strands, and the rope itself were not coated or saturated with lubricant. The endurance of the steel rope was estimated by the number of bends of the sample until it was completely destroyed. The research results showed that the proposed method allows us to simulate the operation of ropes exposed to river, sea water and various corrosive environments on ships, on drilling rigs, in mines, wells, and also to reduce the test time by more than 3 times. In the statistical processing of the results, it was found that the difference between the true values during the tests according to the proposed accelerated method with respect to the standard method does not exceed 7%, and the relative measurement error is less than with standard tests.

Keywords: rope, wear, endurance, running machine.

УДК: 620.199

Стендовые ресурсные испытания стальных канатов

Абрамов А. Н., Шолом В. Ю.[†], Крамер О. Л., Головин В. П.

Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008, Россия
«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», ул. Набережная, 122, Уфа, 450057, Россия

Предложена методика ускоренных стендовых испытаний канатов на выносливость в соответствии с ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость» с периодическим воздействием коррозионно-активной среды. Основной целью ускоренных испытаний является получение информации о выносливости каната в течение времени испытания, меньшего, чем заданный ресурс его эксплуатации. Исследование стальных проволоочных канатов по предложенной методике проводили на пробегной машине, спроектированной и изготовленной в Технопарке «ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ». Машина обеспечивает периодическое окунание деформируемого участка каната в коррозионно-активную среду при возвратно-поступательном перемещении и повторно-переменном изгибе образца на 90°. Для испытаний применялись образцы стального каната диаметром 5.6 мм без покрытия двух типов: по ГОСТ 14954-80 (I тип, с металлическим сердечником) и ГОСТ 2688-80 (II тип, с сердечником из органического материала). Влияние смазочного материала в данной работе не рассматривалось. Сердечники, пряди, и сам канат не покрывались и не пропитывались смазочным материалом. Выносливость стального каната оценивалась по количеству перегибов образца до его полного разрушения. Результаты исследований показали, что предложенная методика позволяет моделировать работу канатов, подверженных воздействию речной, морской воды и различных коррозионно-активных сред на судах, на буровых установках, в шахтах, скважинах, а также сократить время испытаний более чем в 3 раза. При статистической обработке результатов установлено, что отличие истинных значений при испытаниях по предложенной ускоренной методике по отношению к стандартному методу не превышает 7%, а относительная погрешность измерений меньше, чем при стандартных испытаниях.

Ключевые слова: канат, износ, выносливость, пробегная машина.

1. Введение

Стальные проволочные канаты широко используются в качестве гибкой тяги механизмов машин с начала 19 века. За прошедшие столетия, несмотря на появление новых конструкций, материалов, технологий, равноценного аналога, сочетающего в себе основные свойства стального каната, такие как прочность, гибкость, широкий температурный диапазон применения, найдено не было [1–4].

Сегодня производятся и используются в различных областях техники множество конструкций канатов, отличающихся в зависимости от назначения и условий эксплуатации. Но главными требованиями к ним по-прежнему остаются прочность, надежность и безопасность в течение всего срока эксплуатации, а задача увеличения ресурса безотказной работы этого ответственного изделия, для конструкторов и технологов остается по-прежнему актуальной [5–9].

В процессе эксплуатации каната, каждая проволока испытывает сложнапряженное деформированное состояние, характеризующееся знакопеременными нагрузками на удар, изгиб, кручение, растяжение и сжатие [10–13]. Кроме того, проволоки стального каната подвергаются воздействию атмосферных осадков, влиянию высоких и низких температур, агрессивной среды, а так же других эксплуатационных и технологических факторов, приводящих к коррозии, накоплению усталостных повреждений и изнашиванию, оказывающих существенное влияние на срок службы каната.

Для стальных канатов в зависимости от условий эксплуатации время безотказной работы составляет более 1000 часов и на проведение экспериментального испытания канатов в реальных условиях требуются длительное время и существенные экономические затраты.

При воздействии коррозионно-активной среды металл, подверженный усталости, претерпевает обратимые и необратимые изменения (в основном разупрочняется), что приводит к понижению его выносливости. По данным Похмурского В.И., относительный предел выносливости канатной проволоки при базе испытаний 107 циклов в коррозионной среде может снижаться в 5 раз [14].

В настоящее время выносливость стальных канатов определяют посредством натурных испытаний образцов на пробегных машинах. На сегодняшний день существует большое количество конструкций пробегных машин, позволяющих проводить натурные испытания различных конструкций канатов [15–19].

Крупнейшие международные компании по производству стальных канатов: «Arcelor-Mittal» (Франция), «PFEIFER» (Германия), «Dawson Group Ltd» (Китай), «Youngwired» (Южная Корея), «Oliveira Sá» (Португалия) и другие как правило проводят испытания на выносливость стальных канатов на пробегных машинах разных конструкций с использованием собственных методик, которые зависят от номенклатуры и требованиям к выпускаемым канатам. Заключение о качестве каната определяют по критериям, при достижении значений которых канат должен быть забракован: снижение

разрывной нагрузке; уменьшение наружного диаметра каната на предельное число процентов; уменьшение размера наружных проволок каната на предельное число процентов; предельное число обрывов проволок на длине одного шага свивки каната и т.п. [21,22].

Периодическому воздействию влаги подвержены практически все канаты, независимо от области их применения. Это и «утренняя роса», конденсат, возникающий при резком изменении температуры окружающего воздуха или самого каната, брызги, течи и другие, штатные и нештатные факторы, возникающие в процессе его эксплуатации. Наличие влаги на поверхности металла приводит к увеличению коррозионной активности окружающей атмосферы.

Периодическое окунание образца каната в коррозионно-активную среду в процессе испытаний, позволит моделировать работу канатов, подверженных воздействию речной, морской воды и различных коррозионно-активных сред на судах, буровых установках, в шахтах, скважинах, а также сократить время испытаний. Основной целью ускоренных испытаний является получение информации о выносливости каната в течение времени испытания, меньшего, чем заданный ресурс его эксплуатации. Поэтому в данной работе предлагается методика ускоренных испытаний, позволяющая оценивать выносливость стального каната с учетом эксплуатационных факторов, использование которой позволит сократить стоимость испытуемых образцов, время и затраты на промышленные испытания, обеспечит изучение механизмов изнашивания и разрушения канатов [20].

2. Материалы и методики

ГОСТом 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость» [23] предусмотрено испытание выносливости стальных канатов, диаметром до 6 мм на пробегной машине (Рис. 1) при соответствующем расчетном статическом нагружении. Выносливость каната характеризуется числом повторных перегибов образца до полного или частичного его разрушения. Существенный недостаток большинства пробегных машин состоит в том, что испытания требуют значительных временных и материальных затрат, к тому же они не позволяют оценить ресурс работы стальных канатов с учетом реальных условий эксплуатации.

Для ускоренных испытаний канатов на выносливость разработана конструкция пробегной машины в соответствии с ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость», которая дополнительно предусматривает периодическое окунание деформируемого участка каната в жидкую коррозионно-активную среду (Рис. 2) [20].

По предлагаемой методике выносливость стальных канатов, так же, как и в ГОСТ 2387-80, может оцениваться по количеству циклов:

- до обрыва первой проволоки (завершения) образца;
- до заданного числа обрывов проволок на длине одного шага свивки образца;

- до заданного числа изгибов образца вокруг сменного ролика;
- до полного разрушения образца каната.

Испытания стальных канатов на выносливость проводили на пробегной машине, спроектированной и изготовленной в Технопарке «ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ». Исследовались образцы стального каната диаметром 5.6 мм без покрытия двух типов: по ГОСТ 14954-80 (I тип, с металлическим сердечником) (Рис. 3) и ГОСТ 2688-80 (II тип, с сердечником из органического материала) (Рис. 4).

В качестве коррозионно-активной среды использовался 5% водный раствор NaCl.

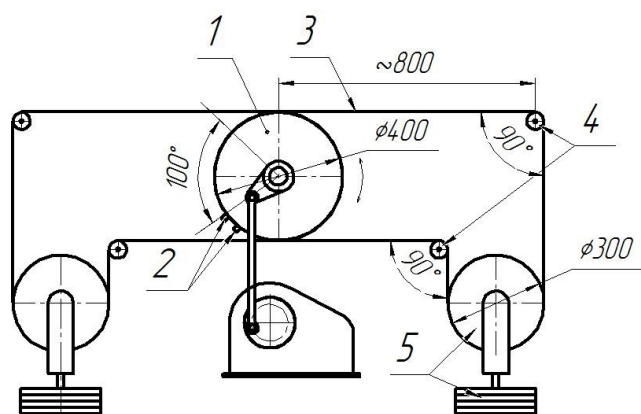


Рис. 1. Пробегная машина для испытания стальных канатов на выносливость по ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость»: 1 — ведущий барабан; 2 — зажимы для крепления концов образца к барабану; 3 — испытуемый образец стального каната; 4 — сменные ролики, обеспечивающие изгиб образца на 90°; 5 — грузовой ролик.

Fig. 1. A running machine for testing steel ropes for endurance on GOST 2387-80 “Steel ropes. Test method for toughness and accelerated tests of the methodology”: 1 — leading drum; 2 — clips for attaching the ends of the sample to the drum; 3 — a test sample of a steel rope; 4 — interchangeable rollers, providing a curve of the sample by 90°; 5 — cargo truck.

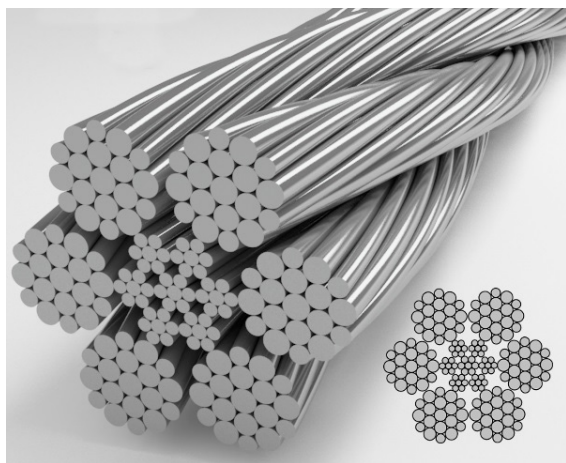


Рис. 3. Канат I типа.

Fig. 3. Rope I type.

Для оценки сходимости результатов была проведена серия сравнительных испытаний по разработанной методике и по ГОСТ 2387-80.

Учитывая большой разброс результатов, характерный для усталостных испытаний, для уменьшения погрешности при определении истинных значений испытывались по 15 образцов одинаковых канатов.

Испытания проводились при скорости вращения барабана 120 оборотов в минуту, обеспечивающего возвратно-поступательные перемещения образца на длине 350 мм. Нагрузка на одну ветвь каната составляла 245 Н, испытания проводились до полного разрушения образцов. Сменные ролики диаметром 55 мм

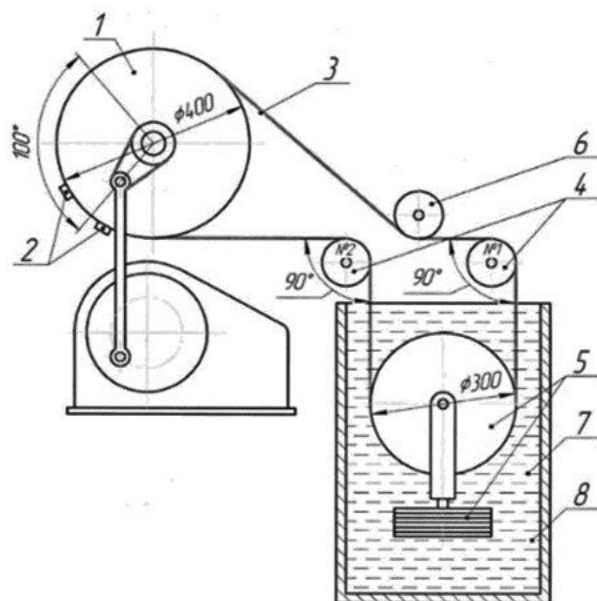


Рис. 2. Машина для ускоренных испытаний канатов на выносливость в жидких средах: 1 — ведущий барабан, 2 — зажимы для крепления образца каната, 3 — образец каната, 4 — сменные ролики, 5 — грузовой ролик, 6 — направляющий ролик, 7 — съемная емкость, 8 — жидкая среда.

Fig. 2. Machine for accelerated testing of endurance ropes in liquid environments: 1 — lead drum, 2 — clamps for fastening a sample rope, 3 — rope sample, 4 — interchangeable rollers, 5 — cargo roller, 6 — guide roller, 7 — removable capacity, 8 — liquid medium.

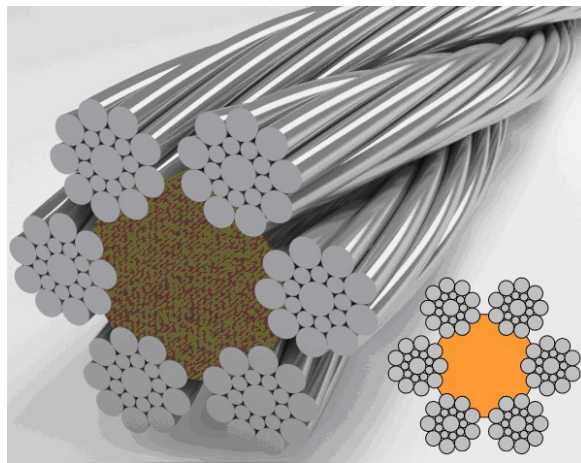


Рис. 4. Канат II типа.

Fig. 4. Rope II type.

обеспечивали изгиб образца на 90°. Диаметр сменных роликов и нагрузка на одну ветвь каната выбирались в зависимости от диаметра каната по ГОСТ 2172-80 «Канаты стальные авиационные. Технические условия».

Выносливость стального каната оценивалась по количеству перегибов образца каната до его полного разрушения.

3. Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на выносливость по стандартной и предлагаемой методике, представлены в Табл. 1.

Статистическая обработка результатов испытаний производилась в соответствии п.4.2 ГОСТ-Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений» (Табл. 2).

Согласно полученным результатам, выносливость каната первого типа, при испытаниях по стандартной методике в 1.505 раза выше, чем у каната второго типа. При ускоренных испытаниях наблюдается такая же зависимость, — выносливость каната с металлическим сердечником выше в 1.587 раза, чем каната с органической вставкой. (При этом следует отметить, что в проведенных испытаниях ни сердечники, ни пряди, ни сам канат не покрывались и не пропитывались смазочным материалом. Наличие смазочного материала в конструкции каната многократно увеличивает выносливость и существенно влияет на его прочностные характеристики. Влияние смазочного материала в данной работе умышленно не рассматривалось).

Как видно из экспериментальных данных, при испытаниях на выносливость по стандартному методу база

Табл. 1. Результаты сравнительных испытаний на выносливость по стандартной и предлагаемой ускоренной методике.

Table 1. The results of comparative endurance tests according to the standard and proposed accelerated methods.

№ образца Sample №	Тип каната / Rope type			
	I		II	
	Стандартная методика Standard method	Ускоренные испытания Expedited technique	Стандартная методика Standard method	Ускоренные испытания expedited technique
	Количество циклов до разрыва Number of cycles to break		Количество циклов до разрыва Number of cycles to break	
1	145 912	44 625	237 492	75 036
2	175 041	41 516	265 815	76 122
3	171 555	44 701	256 217	73 095
4	146 262	47 506	272 238	81 232
5	126 056	46 725	276 074	60 955
6	131 680	51 800	271 501	77 754
7	208 449	45 304	277 065	85 284
8	255 970	59 400	276 858	66 935
9	173 295	48 200	267 055	74 858
10	191 135	48 923	235 099	79 910
11	181 553	44 040	266 984	80 442
12	227 953	47 577	301 297	76 454
13	173 523	45 347	294 000	77 332
14	212 225	45 428	283 817	76 762
15	128 828	55 870	206 702	75 936

Табл. 2. Статистическая обработка результатов испытаний.

Table 2. Statistical processing of test results.

Показатель Parameter	Тип каната / Rope type			
	I		II	
	Стандартные испытания Standard method	Ускоренные испытания Expedited technique	Стандартные испытания Standard method	Ускоренные испытания Expedited technique
X_{\max}	255 970	59 400	301 297	85 284
X_{\min}	126 056	41 516	20 702	60 955
Истинное значение True value	176 629 ± 21 048	47 797 ± 2 604	265 881 ± 13 354	75 874 ± 3 220
Относительная погрешность Relative fault	11.92%	5.45%	5.02%	4.24%
Доверительная вероятность Confidence probability	0.95	0.95	0.95	0.95

циклов до разрушения образца в зависимости от конструкции каната составляет от $1.5 \cdot 10^5$ до $3.0 \cdot 10^5$ циклов, время безостановочной работы пробегной машины при этом составляет от 20 до 40 часов. Ускоренный метод позволяет уменьшить базу циклов испытаний до $5.0 - 8.0 \cdot 10^4$ и сократить время работы машины до 6–12 часов.

Из представленных расчетов можно видеть, что предложенная методика ускоренных испытаний позволяет достоверно оценивать выносливость стального каната и сокращает время испытаний более чем в 3 раза.

4. Выводы

1. Предлагаемая методика ускоренных испытаний стальных канатов на выносливость хорошо коррелирует с методом испытаний по ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость».

2. Периодическое окунание деформируемого участка каната в коррозионно-активную среду в процессе испытаний многократно уменьшает выносливость испытываемого образца и, соответственно, время испытаний, более чем в 3 раза.

3. Отличие истинных значений, полученных при испытаниях различных типов канатов на выносливость по предложенной ускоренной методике, не превышает 7% по отношению к стандартному методу.

4. Относительная погрешность измерений по ускоренной методике меньше, чем при стандартных испытаниях.

5. Предлагаемую методику ускоренных испытаний можно рекомендовать к использованию для определения ресурса канатов различных типов.

Литература/References

1. W.S. Utting, N. Jones. Int. J. Mech. Sci. 29, 605 (1987). [Crossref](#)
2. D. Elata, R. Eshkenazy, M. P. Weiss. Int. J. Solids Struct. 41, 1157 (2004). [Crossref](#)
3. L.M. Shkolnik. Metodika ustalostnykh ispytaniy. Moscow, Metallurgiya (1978) 304 p. (in Russian) [Л.М. Школьник Методика усталостных испытаний. Москва, Металлургия (1978) 304 с.]
4. H. Usabiaga, J.M. Pagalday. J. Solids Struct. 45 (21), 5503 (2008). [Crossref](#)
5. S. A. Velinsky, G. L. Anderson, G. A. Costello. J. Eng. Mech. Div. 110, 380 (1984). [Crossref](#)
6. A. Cardou, C. Jolicoeur. Appl. Mech. Rev. 50, 1 (1997). [Crossref](#)
7. M. A. Urchegui, W. Tato, X. Gomez. J. Mat. Eng. Perform. 17, 550 (2008). [Crossref](#)
8. C.R. Chaplin. OIPEEC Bulletin. 70, 31 (1995).
9. C.R. Chaplin. J of the Inst. of Mining Electrical and Mechanical Engineers. 76, 213 (1994).
10. M. Giglio, A. Manes. Eng. Fail. Anal. 12, 549 (2005). [Crossref](#)
11. S.R. Ghoreishi, T. Messenger, P. Cartraud, P. Davies. Int. J. Mech. Sci. 49, 1251 (2007). [Crossref](#)
12. I.I. Markhel. Kranovyye kanaty. Moscow, Mashinostroyeniye (1983) 128 p. (in Russian) [И.И. Мархель. Крановые канаты. Москва, Машиностроение (1983) 128 с.]
13. J.J. Evans, I.M. L. Ridge, C.R. Chaplin. J of Strain Analysis. 36 (2), 219 (2001). [Crossref](#)
14. V.I. Pohnmur. Korroziionnaya ustalost' metallov. Moscow, Metallurgiya (1985) 207 p. (in Russian) [В.И. Похмурский. Коррозионная усталость металлов. Москва, Металлургия (1985) 207 с.]
15. K. Wire. Ropes. Berlin-Heidelberg, Springer Verlag (2007) 322 p.
16. Patent RF № 2416083, 10.04.2011 (in Russian) [Патент РФ № 2416083, 10.04.2011].
17. Patent RF № 352167, 21.11.1972 (in Russian) [Патент РФ № 352167, 21.11.1972].
18. Patent RF № 2440564, 20.01.2012 (in Russian) [Патент РФ № 2440564, 20.01.2012].
19. Patent RF № 2444718, 10.03.2012 (in Russian) [Патент РФ № 2444718, 10.03.2012].
20. Patent RF № 2444719, 27.12.2017 (in Russian) [Патент РФ № 2444719, 27.12.2017].
21. ASTM A931-08 (2013) Standard Test Method for Tension Testing of Wire Ropes and Strand.
22. ISO 4309-2017 Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, inspection and discard.
23. GOST 2387-80 «Steel ropes. Endurance Test Method» Moscow, Publishing house of standards (1980) (in Russian). [ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость». Москва, Издательство стандартов (1980).]