

УДК 621.86/87

Влияние высокотемпературных воздействий на риск эксплуатации подъёмных канатов¹

М. Н. Хальфин

(Южно-Российский государственный технический университет),

А. А. Короткий

(Донской государственный технический университет)

При общей оценке безопасности стального каната необходимо установить, что в процессе эксплуатации характер, значения и количество дефектов не превысят допустимые нормы браковки. Вследствие высокотемпературного воздействия при эксплуатации стального каната происходит неравномерный нагрев проволок. Это приводит к изменению напряжённо-деформированного состояния каната, и, соответственно, возрастает риск возникновения аварии. С увеличением температуры нагрева до 370 °С стальные канаты необходимо браковать даже при отсутствии волнистости. Риск обрыва усугубляется тем, что технология изготовления стальных канатов, в том числе и с механическим сердечником, допускает несовершенства (различную длину прядей). При эксплуатации короткие пряди перегружаются, а длинные недогружаются — так возникает волнистость. Для повышения безопасности эксплуатации подъёмных канатов в условиях высокотемпературных воздействий (при температуре свыше 370 °С) предлагается использовать алгоритм, учитывающий риск деградационных процессов в стальном канате, а также специальные конструкции канатов с индикаторными проволоками.

Ключевые слова: подъёмный канат, высокотемпературное воздействие, риск, эксплуатация, браковочные показатели, нормы браковки, оценка безопасности, напряжённо-деформированное состояние.

Введение. Оценку безопасности при эксплуатации стальных канатов подъёмных сооружений принято проводить на основе анализа развития во времени браковочных показателей (дефектов). К последним относятся: изменение геометрии $P_1(t)$, коррозия и износ $P_2(t)$, обрывы проволок (усталость) $P_3(t)$, повреждение в результате температурного воздействия $P_4(t)$. Здесь t — текущее время эксплуатации каната.

Под изменением параметров понимают величину $P_n(t)$, представленную в виде:

$$P_n(t) = P_{io} + P_i(t), \quad (1)$$

где P_{io} — склеромная часть $P_n(t)$, т. е. независимая от t и связанная с однократным приложением нагрузок; $P_i(t)$ — реономная часть $P_n(t)$, которая накапливается во времени, например в процессе высокотемпературного воздействия; n — тип дефекта; i — текущее значение нормы браковки.

При общем подходе к оценке безопасности стального каната необходимо доказать, что в процессе эксплуатации значения норм браковки не превысят допустимые дискретные значения, т. е.

$$P_n(t) \leq [P_n], \quad (2)$$

где $n = 1 \div 4$.

Основная часть. Рассмотрим процесс эксплуатации стального каната в условиях высокотемпературного воздействия. В этом случае происходит неравномерный нагрев проволок, приводящий к изменению напряжённо-деформированного состояния каната и, соответственно, к потере его прочности.

¹ Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

Условия безопасности стальной каната можно записать в виде:

$$y = F - Q > 0 \text{ при } R \leq [R], \quad (3)$$

где F — несущая способность каната; Q — растягивающая нагрузка, действующая на канат при эксплуатации; R , $[R]$ — расчётное и допустимое значение риска эксплуатации.

Принимая во внимание, что несущая способность каната и растягивающая нагрузка от веса груза распределены по нормальному закону [1, 2], рассмотрим выражение (3) с точки зрения вероятностного аспекта природы их взаимодействия.

В качестве реперного значения риска при нормировании безопасности стального каната при высокотемпературном воздействии можно принять значение 10^{-5} [3].

Если величины Q и F имеют нормальные распределения с математическим ожиданием Q_0 и F_0 и среднеквадратическими отклонениями σ_Q и σ_F соответственно, величина y будет иметь математическое ожидание $V_y = F_0 - Q_0$ с расчётным риском:

$$R = f \left(\frac{Q - F}{\sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_F^2}} \right), \quad (4)$$

где σ_Q — величина для конкретного грузоподъёмного крана, характеризующая действующие во времени нагрузки на стальной канат; σ_F — величина, характеризующая несущую способность в зависимости от деградационных процессов в стальном канате, $P_i(t)$.

Иллюстрация условия безопасности стального каната (3) в вероятностной постановке приведена на рис. 1.

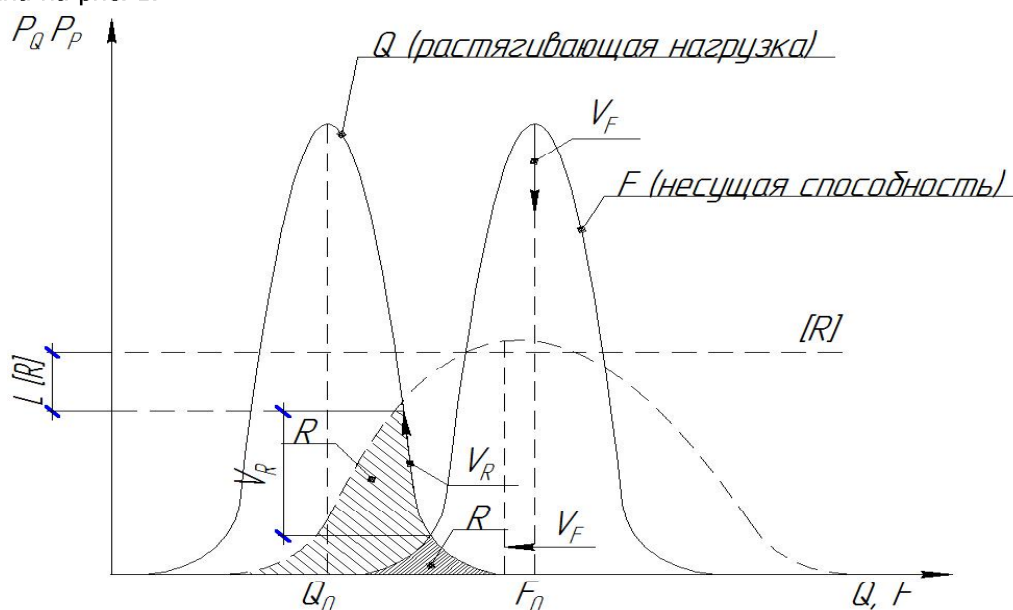


Рис. 1. Кривые плотности вероятности распределения фактической нагрузки Q и несущей способности F стального каната, представленных моделью «нагрузка — несущая способность»: $L[R]$ — расстояние до предельного значения риска $[R]$; V_R — скорость изменения расчётного риска в процессе эксплуатации; V_F — скорость изменения несущей способности за счёт высокотемпературного воздействия; Q_0 , F_0 — математическое ожидание, соответственно, растягивающей нагрузки Q и несущей способности F ; $[R]$ — допустимый риск

Стрелками и пунктирными линиями на рис. 1 показан характер изменения во времени указанных величин при эксплуатации. Заштрихованная площадь соответствует возможным значениям рисков.

На кривых, расположенных ниже уровня допустимого риска, значениями величин Q и F обозначены «зоны относительной опасности» (эксплуатация возможна с ограничениями). Анало-

гичным образом на кривых, расположенных выше уровня допустимого риска, представлена «зона повышенной опасности» (требуется немедленная замена стального каната).

Вследствие высокотемпературного воздействия на стальной канат, как показано в [4], его несущая способность уменьшается на 52 % и составляет всего 48 % от начального значения. Кроме того, при высокотемпературном воздействии происходит значительная потеря несущей способности — у проволок наружного слоя на 64 %, у проволок внутреннего слоя на 32 %. Таким образом, несущая способность проволок наружного слоя составляет 36 %, внутреннего слоя — 68 %.

В работе [5] приведён график изменения суммарного разрывного усилия стального каната в зависимости от температуры (рис. 2).

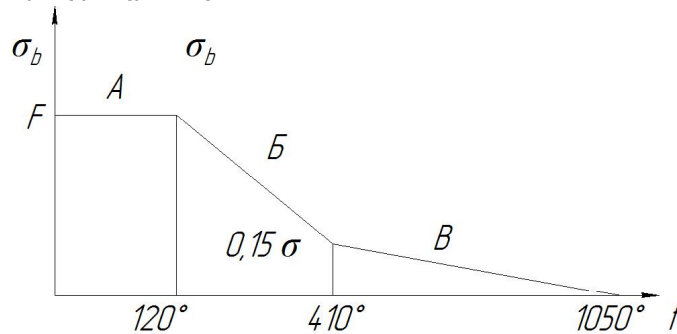


Рис. 2. Влияние температуры на несущую способность каната

Как видно из рис. 2, в зоне А, т. е. при изменении температуры нагрева проволок до 120 °С несущая способность каната не изменяется. При изменении температуры нагрева от 120 °С до 410 °С (зона Б) несущая способность каната уменьшается по линейному закону до 0,15 F. При температуре свыше 410 °С, несущая способность каната снижается и становится равной нулю при 1050 °С.

Коэффициент запаса прочности каната имеет вид:

$$Z = \frac{F_0}{Q_0}, \quad (5)$$

Выражение коэффициента запаса прочности каната в относительной форме для зоны Б при температуре нагрева 410 °С и 120 °С имеет следующий вид:

$$\frac{Z_{410}}{Z_{120}} = \frac{\frac{F_{0,410}}{Q_0}}{\frac{F_{0,120}}{Q_0}} = 0,15; \text{ или } Z_{410} = 0,15Z_{120} \quad (6)$$

Как следует из (6), коэффициент запаса прочности каната уменьшается при изменении температуры от 120 °С до 410 °С на 85 % и соответственно возрастает риск возникновения аварии.

Риск обрыва усугубляется тем, что технология изготовления стальных канатов, в том числе и с механическим сердечником, допускает несовершенства (различную длину прядей). При этом короткие пряди перегружаются, а длинные недогружаются — таким образом при эксплуатации каната возникает волнистость.

В работе [6] было получено уравнение относительного радиуса волнистости R_b , выраженного через радиус каната R_k из условия прочности наиболее нагруженной проволоки:

$$\frac{R_b}{R_k} \leq \frac{\frac{\sigma_b}{Z_{np}} - \sigma_p}{R_k \cdot Q \cdot A}, \quad (7)$$

где σ_p — номинальное растягивающее напряжение; Z_{np} — коэффициент запаса прочности проволок наиболее короткой пряди каната; A — обобщённый коэффициент жёсткости каната:

$$A = E \cos^2 \alpha \cos \beta \left[\frac{\Delta_1}{\Delta} \left(\cos^2 \beta + \frac{r}{R} \cos \alpha \cdot \sin^3 \beta \cos \beta \right) + \frac{\Delta_2}{\Delta} R \left(\sin \beta \cos \beta + \frac{r}{R} \cos^4 \beta \right) + \frac{\Delta_3}{\Delta} R \cos^2 \beta \right], \quad (8)$$

где α, β — углы свивки соответственно проволок и прядей; r, R — радиус свивки слоя проволок и прядей; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ — определители второго порядка; Δ — определитель третьего порядка [6, 7].

На основании исследования [6] было установлено, что допустимое отношение $\frac{R_b}{R_k}$ составляет 0,08. Это значение в качестве браковочного показателя по волнистости используется в «Правилах устройства и безопасности эксплуатации грузоподъёмных кранов» [8]: «При совпадении направлений спирали волнистости и свивки каната и равенстве шагов спирали волнистости H_b и свивки каната H_k канат бракуется при $d_b \geq 1,08d_k$, где d_b — диаметр спирали волнистости, d_k — номинальный диаметр каната».

Формула (7) ужесточает приведённую в [8] норму браковки стальных канатов по критерию волнистости.

Заключение. На анализе возможных вариантов выполнения условия безопасности (3) основан алгоритм оценки безопасности стального каната при его эксплуатации в условиях высокотемпературного воздействия. Исходя из этих данных, принимают решение о его замене (табл.).

Канаты, эксплуатирующиеся в условиях высокотемпературного воздействия, следует рассматривать как невозстанавливаемые изделия. Они требуют замены при снижении несущей способности до критического состояния. В этом случае их дальнейшая эксплуатация невозможна из-за дефектов, выявляемых методами и средствами визуального и инструментального контроля.

Алгоритм оценки безопасности стального каната с учётом риска, математического ожидания нагрузки Q , несущей способности F и дефектов n_i

Оценка	Признаки опасности	Категория отказов	Количественные параметры	Рекомендации
Отлично	Отсутствуют	Невероятны	$Q < F$ Параметры дефектов $n_i < [n]$	Эксплуатация без ограничений
Хорошо	Необходимое условие создания аварийной ситуации	Отказ с малыми последствиями	$Q > F$ $n_i \rightarrow [n]$ Риск при эксплуатации $Q > F < [R]$	Применять неразрушающие методы дефектоскопии
Удовлетворительно	Необходимое и достаточное условие создания аварийной ситуации	Критичный (возможны разрушения, угроза жизни объекта)	$Q > F$ $n_i > [n]$ $Q > F < [R]$	Ежедневный (ежесменный) контроль
Неудовлетворительно	Необходимое и достаточное условие аварии	Катастрофический (потеря объекта)	$Q > F$ $n_i > [n]$ $Q > F > [R]$	Эксплуатация запрещена, замена

Для повышения безопасности эксплуатации подъёмных канатов в условиях высокотемпературных воздействий (при температуре свыше 370 °С) рекомендуется:

— использовать предложенный алгоритм, учитывающий риск деградационных процессов (дефектов) в стальном канате;

— применять специальные конструкции канатов с индикаторными проволоками [9].

Библиографический список

1. Справочник по кранам. В 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузки. Основы расчёта кранов, их приводов и металлоконструкций / В. И. Брауде [и др.]; под общ. ред. М. М. Гохберга. — Москва : Машиностроение, 1988. — 536 с.

2. Канаты стальные. Технические условия: ГОСТ 3241—91. — Москва : Изд-во стандартов, 1992. — 18 с.

3. Декларация о предельно допустимых уровнях риска / Российское научное общество анализа риска // Проблемы анализа риска. — 2006. — Т. 3, № 2. — С. 162—163.

4. Силуянова, Н. Н. Температурное воздействие на стальные канаты / Н. Н. Силуянова, Е. Н. Лобанова // Сталеві канати : збірник наукових праць. — Одесса : Астропринт, 2005. — С. 202—205.

5. Липатов, А. С. Методы повышения безопасности грузоподъёмных кранов при ненормируемых условиях эксплуатации: дисс. д-ра. техн. наук / А. С. Липатов. — Новочеркасск, 2006. — 253 с.

6. Хальфин, М. Н. Расчёт стальных канатов с учётом различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Спецвыпуск. — 2005. — С. 5—13.

7. Хальфин, М. Н. Развитие теории стальных канатов и её практическое подтверждение / М. Н. Хальфин, А. А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 1 — С. 18—22.

8. Правила устройства и безопасности эксплуатации грузоподъёмных кранов: ПБ 10-382-00: утв. Госгортехнадзором России 31.12.99 // Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в области котлонадзора и надзора за подъёмными сооружениями. — Серия 10, вып. 7. — Москва : Госгортехнадзор России, НТЦ «Промышленная безопасность», 2000 — 254 с.

9. Стальной канат и способ его браковки: пат. 2299939 Рос. Федерация D07B1/14 / А. А. Короткий [и др.]; заявл. 13.04.05; опубл. 27.05.07, Бюл. № 15.

Материал поступил в редакцию 03.12.2012.

References

1. Braude, V. I., et al. Under the general editorship of Gohberg, M. M. Spravochnik po kranam. V 2 t. T. 1. Charakteristiki materialov i nagruzki. Osnovy` rascheta kranov, ix privodov i metallokonstrukcij. [Reference guide in cranes. In 2 vol. Vol. 1. Material performance and loads. Design basis of cranes, their drives, and metal structures.] Moscow : Mashinostroenie, 1988, 536 p. (in Russian).

2. Kanaty` stal`ny`e. Texnicheskie usloviya: GOST 3241—91. [Steel ropes. Specifications: State standard 3241—91.] Moscow : Izdatel`stvo standartov, 1992, 18 p. (in Russian).

3. Deklaraciya o predel`no dopustimy`x urovnyax riska. Rossijskoe nauchnoe obshhestvo analiza riska. [Declaration on maximum permissible risk levels. Russian Scientific Society for Risk Analysis.]. Problemy` analiza riska, 2006, vol. 3, no. 2, pp. 162—163 (in Russian).

4. Siluyanov, N. N., Lobanova, E. N. Temperaturnoe vozdejstvie na stal`ny`e kanaty`. [Thermal effect on steel ropes.] Stalevi kanati : zbirnik naukovix prac` , Odessa : Astroprint, 2005, pp. 202—205 (in Russian).

5. Lipatov, A. S. Metody` pov`sheniya bezopasnosti gruzopod`emny`x kranov pri nenormiruemy`x usloviyax e`kspluatatsii: diss. d-ra. texn. nauk. [Safety improving methods for cargo cranes under nonspecified service conditions: Dr. tech.sci.diss.] Novocherkassk, 2006, 253 p. (in Russian).

6. Khalfin, M. N. Raschet stal`ny`x kanatov s uchetom razlichiya geometricheskix parametrov i mexanicheskix svojstv provolok. [Steel rope computation with account for difference in wire geometrics and mechanics.] Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. North Caucasian region. Technical sciences. Special edition, 2005, pp. 5—13 (in Russian).

7. Khalfin, M. N., Korotkiy, A. A. Razvitie teorii stal'ny'x kanatov i ee prakticheskoe podtverzhenie. [Development of steel rope theory and its practical application acknowledgement.] *Bezopasnost' truda v promy'shlennosti*, 2006, no. 1, pp. 18–22 (in Russian).

8. Pravila ustrojstva i bezopasnosti e'kspluatacii gruzopod'emny'x kranov: PB 10-382-00: utv. Gosgortekhnadzorom Rossii 31.12.99. [Regulations on Installation and Safe Operation of Cargo Cranes: PB 10-382-0: approved by Gosgortekhnadzor of Russia, 31.12.99.] *Normativny'e dokumenty` po bezopasnosti, nadzornoj i razreshitel'noj deyatel'nosti v oblasti kotlonadzora i nadzora za pod'emny`mi sooruzheniyami*. [Requirements documents on safety, supervisory and permitting activities in boiler and lifting devices inspection. Series 10, iss.7] Moscow : Gosgortekhnadzor of Russia, R&D centre «Promy'shlennaya bezopasnost'», 2000, 254 p. (in Russian).

9. Korotkiy, A. A., et al. Stal'noj kanat i sposob ego brakovki: pat. 2299939 Ros. Federaciya D07B1/14. [Steel rope and its rejection method: Patent RF no. 2299939.] (in Russian).

HIGH-TEMPERATURE EFFECT ON OPERATION RISK OF LIFT CABLES¹

M. N. Khalfin

(South-Russian State Technical University),

A. A. Korotkiy

(Don State Technical University)

As a result of the steel cable security rating, it is essential to determine that the nature, value, and quantity of defects will not exceed the critical reject limits while in operation. The high-temperature impact results in uneven wire heating in the cable operation activity. It leads to the cable deflected mode change, and, consequently, the accident risk grows. On the increase of heating temperature to 370 °C, steel cables need to be rejected, even without waviness in them. The risk of rope break is dramatized by the fact that the steel cable technology, including those with the mechanical core, admits irregularities (various strand length). While in operation, short strands are overloaded, and the long ones are underloaded which results in the waviness origination. For higher safety of the lift cables under the high-temperature conditions (at temperatures above 370 °C), the algorithm considering the degradation risk in the steel cable, and special cable structures with indicator wires are offered for application.

Keywords: lift cable, high-temperature effect, risk, exploitation, rejection indices, rejection rates, safety assessment, deflected mode.

¹ The research is done within the frame of the independent R&D.