

УДК 621.86.06

DOI: 10.15276/pidtt.2.63.2020.07

Чаюн И. М., Вовк П. Е.

Одесский национальный политехнический университет

РАСЧЕТ КАНАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПО ПРЕДЕЛЬНОМУ УПРУГОМУ СОСТОЯНИЮ

Анотація. Розроблено методикау теоретичного визначення міцностних P_e та деформативних характеристик граничного пружного стану канатів для чотирьох схем навантаження в початковому стані, а також з урахуванням експлуатаційного обриву дротів: дві схеми - це розтягання з навивкою на барабан при вільному підвісі вантажу і при вантажі в направляючих, дві інші схеми - це розтягання прямого каната без згину. В якості граничного пружного прийнято стан каната, при якому один з дротів (або група) досягають деформації порогу пружності (плинності). Зусилля розтягування канатів P_e граничного пружного стану істотно залежать від схеми навантаження, конструкції каната та наявності обривів дротів. Для досліджуваних схем навантаження і різних конструкцій канатів зусилля представлені у відносному вимірі $\bar{P}_e = P_e/P_c$, де P_c - сумарне розривне зусилля дротів каната. При розтягуванні з вільно підвішеним вантажем $\bar{P}_e = 0,22 - 0,31$ (менші значення при розтягуванні з навивкою на барабан); при вантажі в направляючих $\bar{P}_e = 0,61 - 0,72$. Головною причиною низьких значень характеристик \bar{P}_e є нерівномірність деформацій розтягання дротів в канаті. Це в першу чергу обумовлюється деформацією θ крутіння каната, в другу деформацією χ згину. Величини середнього умовного напруження σ показують, що їх рівень в граничному пружному стані канатів вище цього параметра при робочих (експлуатаційних) навантаженнях. Це корисно враховувати при аналізі нормативних запасів міцності для конкретних схем навантаження канатів.

Наявність обривів дротів призводить до формування жорсткостей впливу: поздовжньо згинних G_{13}, G_{14} , крутильно згинних G_{23}, G_{24} , а також, згинно-згинної G_{34} . При розтягуванні канатів в стані з цими жорсткостями виникають додаткові деформації згину і крутіння каната, а відповідно і деформації дротів як в сторону збільшення в порівнянні з номінальним станом, так і в бік зменшення. Характеристики \bar{P}_e в станах з обривами дротів при розтягуванні в направляючих зменшуються, а при вільно підвішеному вантажі залишаються практично незмінними, тому що деформації крутіння

канатів істотно не змінюються.

Ключові слова: канат, межа плинності, пружний стан, напруження, деформації, тертя.

Введение. В основе методов расчета на прочность лежит сопоставление двух состояний детали, или конструкции, в целом: номинального и предельного. В методе расчета по допускаемым напряжениям в качестве параметра номинального состояния, принимается напряжение (нормальное, касательное или эквивалентное) в той точке детали, где его величина наибольшая. В качестве предельного состояния принимается напряжение, равное пределу текучести (упругости) σ_T или пределу прочности σ_B , которые являются прочностными характеристиками материала детали. Применительно к нормальным напряжениям условие прочности имеет вид

$$\max \sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_L}{[n]}, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – так называемое допускаемое напряжение;

$\sigma_L = \sigma_T$ или $\sigma_L = \sigma_B$ – предельное напряжение.

На диаграмме $\sigma - \varepsilon$ (рис.1) смысл условия (1) определяется тремя напряжениями: допускаемым $[\sigma]$, предельным σ_L и третьим напряжением – текущим $0 \leq \max \sigma \leq \sigma_L$, которое при предусмотренных условиях эксплуатации может подойти к предельному σ_L но не превысит его. Это гарантируется нормативным $[n]$ запасом.

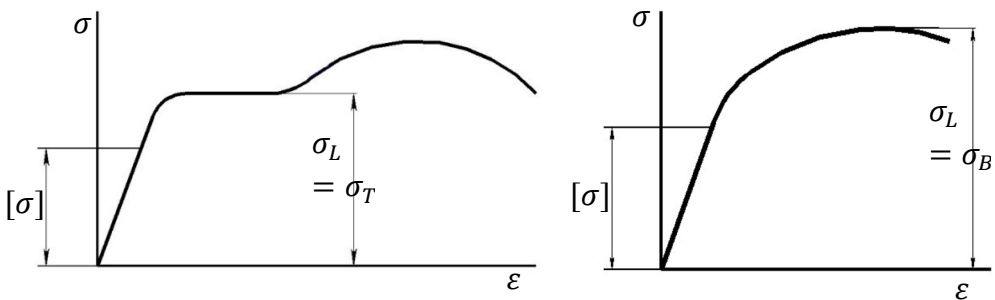


Рисунок 1 – Соотношение напряжений номинального (допускаемого) $[\sigma]$ и предельного σ_L

Термин «допускаемое напряжение» не совсем точно отражает суть метода. Точнее отвечал бы сути термин «номинальное напряжение».

В методе расчета по несущей способности номинальным принимается состояние, соответствующее паспортным данным, например, грузоподъемности крана. Предельным состоянием является

несущая способность детали или конструкции в целом (это нагрузка, превышение которой ведет к разрушению).

1. Анализ литературы. По сути канаты на прочность рассчитываются по несущей способности. Здесь следует возразить утверждению в [1], что прочностной расчет канатов выполняется по методу допускаемых напряжений. Предельное состояние в расчете каната отражается его характеристикой, которая в [2] называется «разрывное усилие каната в целом», в [3] называется *Mindest bruchkraft* – (минимальное разрывное усилие каната). Обобщенная суть этих характеристик

$$P_H = KP_C, \quad (2)$$

где $K = 0,83$ согласно [2] и $K = 0,75 \div 0,9$ согласно [3] (меньшее значение относится к трехслойному канату двойной свивки, больше к однослойным конструкциям);

P_C – суммарное разрывное усилие всех проволок каната ($P_C = F_C \cdot \sigma_B$, где F_C – суммарная площадь сечения проволок, σ_B – предел их прочности).

Известно, что такая расчетная схема в определении несущей способности P_H каната весьма неточна, т.к. неполноценно учитывает схему нагружения каната его конструкцию и пластические свойства проволок.

В работе [4,5] приведен расчет несущей способности канатов при растяжении в направляющих и растяжении свободно подвешенным грузом на основе исследования упруго-пластического деформирования проволок с учётом их пластических свойств (равномерной предельной деформации e_L , методика определения которой описана в [6]).

Представляется целесообразным по аналогии с методом «допускаемых напряжений» и в расчете канатов использовать две характеристики предельного состояния: усилие растяжения каната, соответствующее предельному упругому состоянию и усилие растяжения, равное несущей способности каната.

2. Изложение основного материала. Целью данной работы является аналитическое определение растягивающих усилий, деформаций и напряжений в проволоках в предельном упругом состоянии каната, что составляет основу прочностного расчета. Указанные исследования относятся как к первому периоду нагружения, так и к эксплуатационному состоянию, связанному с появлением обрывов проволок.

Рассматриваются четыре схемы нагружения каната, две из которых – это растяжение с навивкой на барабан при свободном подвесе груза (рис.2, а) и при грузе в направляющих (рис.2, б) [7].

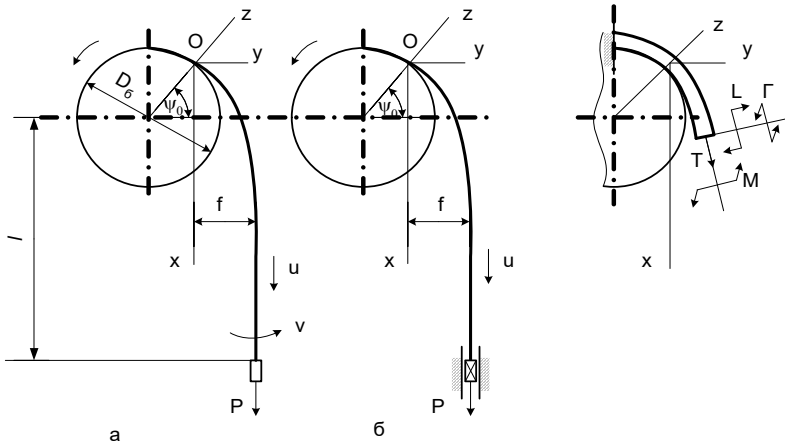


Рисунок 2 – Схемы нагружения каната

Две другие схемы – это растяжение прямого каната можно считать частным случаем двух первых (формально они получаются при диаметре барабана $D_6 \rightarrow \infty$).

2.1 Параметры изгиба. Уравнение изогнутой оси каната (рис. 2)

$$y = f(1 - e^{-kx}); \quad f = \frac{G_{33}}{PR}, \quad (3)$$

где G_{33} – изгибная жесткость сечения каната в плоскости навивки.

Функции кривизны и угла поворота сечений каната

$$\chi = R^{-1}e^{-kx}; \quad \psi = (G_{33} / PR^2)^{0.5} e^{-kx}, \quad (4)$$

где $k = (P / G_{33})^{0.5}$; $R = 2(D_6 + d_k)$; d_k – диаметр каната.

2.2 МКЭ в деформированном состоянии канатов. Из трех разновидностей МКЭ применяем метод перемещений с основным уравнением в таком виде:

$$|G| \cdot |DK| = |F|. \quad (5)$$

Здесь $|G|$ глобальная матрица жесткости сечений каната [7]

$$|G| = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{vmatrix} = \sum_1^S sc \alpha_i \cdot sc \beta_i |K|_i \begin{vmatrix} \Phi_{p_i} & & & 0 \\ & \Phi_{t_i} & & \\ & & \Phi_{u_i} & \\ 0 & & & \Phi_{u_i} \end{vmatrix} \cdot |K|_i^T, \quad (6)$$

где $G_{11}, G_{22}, G_{33}, G_{44}$ – продольная, крутильная и изгибные жесткости сечения каната; $G_{12} = G_{21}, \dots, G_{34} = G_{43}$ – жесткости влияния; $\Phi_p = \pi \delta^2 / 4$; $\Phi_t = \pi \delta^4 / 32$; $\Phi_u = \pi \delta^4 / 64$ – жесткости сечения проволоки (продольная, крутильная, изгибная).

Матрица $|K|_i$ удельных деформаций i -ой проволоки. Ее элементы получены на основе геометрических уравнений деформации

проволок в канате одинарной свивки (в пряди) и прядей в канате двойной свивки [7]

$$|K|_i = \begin{vmatrix} K_{e\varepsilon} & K_{t\varepsilon} & K_{b\varepsilon} & K_{n\varepsilon} \\ K_{e\theta} & K_{t\theta} & K_{b\theta} & K_{n\theta} \\ K_{e\chi} & K_{t\chi} & K_{b\chi} & K_{n\chi} \\ K_{e\zeta} & K_{t\zeta} & K_{b\zeta} & K_{n\zeta} \end{vmatrix} = |KT|_i \cdot |KF|_i =$$

$$= \begin{vmatrix} \bar{K}_{E\varepsilon} & \bar{K}_{T\varepsilon} & \bar{K}_{B\varepsilon} & 0 \\ \bar{K}_{E\theta} & \bar{K}_{T\theta} & \bar{K}_{B\theta} & 0 \\ \bar{K}_{E\chi} & \bar{K}_{T\chi} & \bar{K}_{B\chi} & \bar{K}_{N\chi} \\ \bar{K}_{E\zeta} & \bar{K}_{T\zeta} & \bar{K}_{B\zeta} & \bar{K}_{N\zeta} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} K_{eE} & K_{tE} & K_{bE} & 0 \\ K_{eT} & K_{tT} & K_{bT} & 0 \\ K_{eB} & K_{tB} & K_{bB} & K_{nB} \\ K_{eN} & K_{tN} & K_{bN} & K_{nN} \end{vmatrix}; \quad (7)$$

$|KT|_i$ – матрица удельных деформаций пряди в канате, в которую входит i -я проволока; $|KF|_i$ – матрица удельных деформаций i -ой проволоки в пряди.

В элементах матрицы $|K|_i$ первый индекс указывает деформацию проволок в канате (e – продольная; t – кручения; b и n – изгиба), а второй – деформацию каната, от которой происходит данная деформация проволоки.

В элементах матрицы $|K|_i$ первый индекс указывает деформацию пряди в канате, в которую входит i -я проволока (E – продольная; T – кручения; B и N – изгиба), а второй индекс указывает деформацию каната, от которой происходит данная деформация пряди.

В элементах матрицы $|KF|_i$ первый индекс указывает деформацию проволоки в пряди (e – продольная; t – кручения; b и n – изгиба), а второй – деформацию пряди, с которой непосредственно связана данная деформация проволоки.

Элементы матриц $|KF|_i$ и $|KT|_i$ получаются на основе геометрических уравнений деформации проволок в канате одинарной свивки (пряди) и прядей в канате двойной свивки с учетом поперечного сужения и трения [6].

Деформации каната

$$|DK| = |\varepsilon \theta \chi \zeta| = |G|^{-1} |F|, \quad (8)$$

где ε – продольная деформация; θ – деформация кручения; χ и ζ – деформации изгиба в плоскости барабана и из плоскости.

Вектор внутренних силовых факторов в сечениях каната (рис.2, б)

$$|F| = |T M L G|^T. \quad (9)$$

Компоненты вектора $|F|$ согласно рис.2, б):

$$\text{продольное усилие} \quad T = P \cos \psi, \quad (10)$$

$$\text{крутящий момент} \quad M = M_H \cos \psi, \quad (11)$$

$$\text{изгибающие моменты} \quad L = P f e^{-kx} \sin \psi; \quad \Gamma = M_H \sin \psi, \quad (12)$$

где M_H – реакция направляющих.

2.3 Общее выражение усилия растяжения предельного упругого состояния каната. Предельным упругим считаем состояние каната, при котором один из его элементов достигает деформации соответствующей пределу упругости (пределу текучести) проволоки (в общем случае элементами являются каждая из проволок каната). Это состояние соответствует усилию растяжения каната

$$P_e = \min \frac{e \cdot \kappa_\delta}{\delta_i}; \quad i = 1, 2, \dots, s, \quad (13)$$

где $e = \varepsilon_T$ – предельное значение упругой деформации растяжения проволок в канате (ε_T – деформация проволоки, соответствующая пределу текучести (упругости) по схематизированной диаграмме $\sigma - \varepsilon$ проволоки);

$\kappa_\delta \leq 1$ – коэффициент учета других деформаций проволоки в канате;

δ_i – наибольшее значение среди всех s проволок удельной деформации растяжения i -ой проволоки в канате (т.е. от действия концевой груза $\bar{P} = 1$), которая зависит от его жесткостных характеристик, схемы нагружения, а также наличия обрывов проволок.

2.3.1 Растяжение с навивкой на барабан при грузе в направляющих. Компоненты вектора удельных деформаций каната на основе (5) с использованием (6) – (12) и (3), (4) имеют вид:

$$\bar{\varepsilon} = (A_{11} \cos \psi - A_{12} (A_{12} \cos \psi + A_{14} \sin \psi) / A_{22} + A_{13} f e^{-kx}) / |D|; \quad (14)$$

$$\bar{\theta} = (A_{23} f e^{-kx} - A_{24} \frac{A_{12}}{A_{22}} \sin \psi) / |D|; \quad (15)$$

$$\bar{\chi} = (A_{13} - A_{12} (A_{23} \cos \psi + A_{34} \sin \psi) / A_{22} + A_{33} f e^{-kx}) / |D|; \quad (16)$$

$$\bar{\zeta} = (A_{14} \cos \psi - A_{12} (A_{24} \cos \psi + A_{44} \sin \psi) / A_{22} + A_{34} f e^{-kx}) / |D|. \quad (17)$$

где $|D|$ – определитель матрицы жесткости; $A_{11}; A_{12}; \dots; A_{34}$ – алгебраические дополнения.

Удельная деформация δ_i растяжения проволок в канате

$$\delta_i = \bar{\varepsilon} K_{e\varepsilon} + \bar{\theta} K_{e\theta} + \bar{\chi} K_{e\chi} + \bar{\zeta} K_{e\zeta} \quad (18)$$

зависит от соответствующих удельных деформаций i -ой проволоки, которые для канатов одинарной свивки имеют вид [5]:

$$K_{e\varepsilon} = \cos^2 \alpha (1 - \mu_E \operatorname{tg}^2 \alpha); \quad (19)$$

$$K_{e\theta} = \nu_{e\theta} \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha (r - \mu_T \operatorname{tg} \alpha); \quad (20)$$

$$K_{e\chi} = v_{e\chi} r \cos^2 \alpha \cos \varphi; \quad (21)$$

$$K_{e\zeta} = v_{e\zeta} r \cos^2 \alpha \sin \varphi \quad (22)$$

и от параметров изгиба (3), (4), а они определяются уровнем концевого груза P . Поэтому вычислять усилие растяжения P_e (13) предельного упругого состояния для этой схемы нагружения можно только путем последовательных приближений. В качестве первого приближения следует принимать P_e , отвечающее схеме растяжения прямого каната грузом в направляющих.

2.3.2 Растяжение с навивкой на барабан при свободном грузе

Отличие от предыдущей схемы нагружения состоит только в выражениях удельных деформаций каната:

$$\bar{\varepsilon} = (A_{11} \cos \psi + A_{13} f e^{-kx}) / |D|; \quad (23)$$

$$\bar{\theta} = (A_{12} \cos \psi + A_{23} f e^{-kx}) / |D|; \quad (24)$$

$$\bar{\chi} = (A_{13} \cos \psi + A_{33} f e^{-kx}) / |D|; \quad (25)$$

$$\bar{\zeta} = (A_{14} \cos \psi + A_{34} f e^{kx}) / |D|. \quad (26)$$

Усилие P_e также вычисляется путем последовательных приближений. Для первого приближения следует принимать P_e соответствующее растяжению каната при свободном подвесе груза.

2.3.3 Растяжение прямого каната грузом в направляющих

Удельные деформации каната

$$\bar{\varepsilon} = (A_{11} + A_{12}^2 / A_{22}) / |D|; \quad (27)$$

$$\bar{\theta} = (A_{13} + A_{12} A_{23} / A_{22}) / |D|; \quad (28)$$

$$\bar{\chi} = (A_{13} + A_{12} A_{24} / A_{22}) / |D|; \quad (29)$$

2.3.4 Растяжение прямого каната свободно подвешенным грузом

Удельные деформации каната

$$\bar{\varepsilon} = \frac{A_{11}}{|D|}; \quad \bar{\theta} = \frac{A_{12}}{|D|}; \quad \bar{\chi} = \frac{A_{13}}{|D|}; \quad \bar{\zeta} = \frac{A_{14}}{|D|}. \quad (30)$$

Таким образом, усилие P_e (13) предельного упругого состояния посредством деформации δ_i (18) зависит от жесткостей сечения каната, в том числе и в состоянии наличия обрывов проволок.

3. Жесткости сечения каната с учетом обрывов проволок.

Проволока с обрывом за счет сопротивления от трения получает упругую деформацию, возрастающую по мере удаления от мест обрыва. На определенном расстоянии от обрыва проволока оказывает полноценное сопротивление пропорциональное полной продольной жесткости.

Используем решение [8], в котором сила сопротивления нити (проволоки) навитой на цилиндр с прямой образующей (подходит к канатам (прядам) одинарной свивки) и на цилиндр с винтовой образующей (подходит к канатам двойной свивки) имеет выражение

$$F = P(1 - e^{-fb}); \quad b = \frac{2\pi l \sin \alpha}{h \cos \beta}, \quad (31)$$

где f – коэффициент трения; l – расстояние от места обрыва проволоки до расчетного сечения каната; h – шаг свивки проволок.

На основе (31) получаем связь влияния обрыва проволок с жесткостями сечения каната через изменяющееся значения жесткостей сечений проволок

$$\Phi_p = \frac{\pi \delta^2}{4} E(1 - e^{-fb}). \quad (32)$$

В качестве примера приведены расчеты для двух канатов, сечения которых с нумерацией проволок показано на рис. 3 и 4, где затемнением указаны проволоки с обрывами.

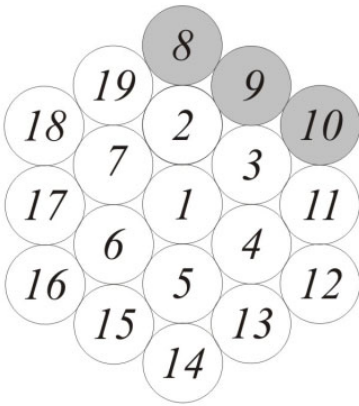


Рисунок 3 – Канат 1+6+12

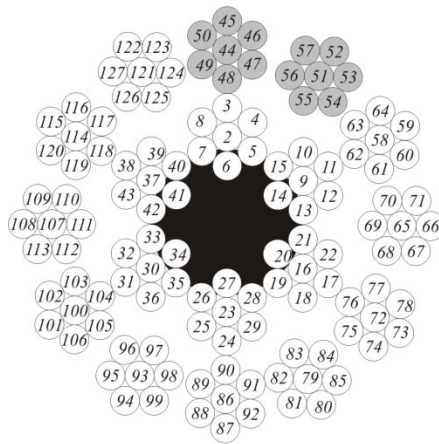


Рисунок 4 – Канат 12(1-6) – 6(1+6) + о.с.

Канат одинарной свивки (рис.3) конструкции 1/1,15+6/1+12/1; диаметр 5,15 мм; $F_C = 15,175 \text{ мм}^2$; суммарное разрывное усилие всех проволок $P_c = 27315 \text{ Н}$; шаг свивки проволок наружного слоя $h = 45 \text{ мм}$; углы свивки $\alpha_2 = 16,75^\circ$; $\alpha_3 = 16,16^\circ$, деформация предела текучести проволоки $\varepsilon_T = 0,0073$. Канат двойной свивки (рис.4) конструкции 12(1-6) – 6(1+6) + о.с.; диаметр 9,3 мм; $F_C = 15,175 \text{ мм}^2$; шаг свивки наружного слоя прядей $h = 256 \text{ мм}$; шаг свивки проволок в прядях $h = 112 \text{ мм}$; диаметры проволок $\delta = 0,6 \text{ мм}$; углы свивки прядей $\beta_2 = -17,5^\circ$; $\beta_3 = 19,5^\circ$; суммарная площадь сечения проволок $F_C = 36,625 \text{ мм}^2$; $P_c = 57000 \text{ Н}$, деформация предела текучести проволоки $\varepsilon_T = 0,00665$.

В табл.1 показано значение жесткостей сечений этих канатов для трех ситуаций: 1 – без обрывов проволок; 2 – обрывы равномерно разнесены в пределах одного шага; 3 – обрывы в одном сечении (это значит в формуле (32) $b=0$).

Таблица 1 – Жесткости сечения канатов $\times 10^{-4}$

Ситуа- ции	$G_{11},$ H	$G_{22},$ $H \cdot мм^2$	$G_{33},$ $H \cdot мм^2$	$G_{44},$ $H \cdot мм^2$	$G_{12},$ $H \cdot мм^2$	$G_{13},$ $H \cdot мм^2$	$G_{14},$ $H \cdot мм^2$	$G_{23},$ $H \cdot мм^2$	$G_{24},$ $H \cdot мм^2$	$G_{34},$ $H \cdot мм^2$
	Канат 1+6+12; диаметр 5,15 мм; шаг $h=45$ мм									
1	270	85,9	24,4	24,5	127	~0	~0	~0	~0	~0
2	233	72,5	23,3	23,9	104,6	-6,2	-3,2	-3,7	-1,9	-0,43
3	229	68,3	20,5	20,8	101,8	-6,7	-3,9	-4,2	-3,4	0,063
Канат 12(1-6) - 6(1+6) + о.с.; диаметр 9,3 мм; $h=112$ мм; $H=256$ мм										
1	473	631	17,9	17,9	337	~0	~0	~0	~0	~0
2	436	565	17,6	17,8	287	-2,6	0,42	-3,5	0,54	0,039
3	419	535	16,1	15,9	266	-3,7	1,03	-5,08	0,95	0,45

В табл. 2 и 3 приведены расчетные значения для 3-х ситуаций усилий растяжения $P_e(13)$ предельного упругого состояния указанных канатов при деформациях ε_T . Усилия представлены в относительном измерении: $\bar{P}_e = P_e / P_c$. Рядом со значениями \bar{P}_e в скобках указаны номера проволок, в которых первыми достигается предельная упругая деформация растяжения равная ε_T . Далее в табл. 2 и 3 приведены деформации $\varepsilon, \theta, \chi, \zeta$ канатов в предельном упругом состоянии; экспериментальные значения напряжений растяжения проволок $\max \sigma$ и $\min \sigma$ (в скобках указаны номера проволок согласно рис. 2 и 3); параметр $\bar{\Delta} = \min \sigma / \max \sigma$, наконец, указаны средние напряжения растяжения: $\sigma = P_e / F_c$ (это напряжение является условным, но оно удобно для интегральной оценки напряженного состояния канатов [1]).

Таблица 2 – Параметры предельного упругого состояния каната 1+6+12; диаметр 5,15 мм

Расчетные параметры	Схемы растяжения			
	1	2	3	4
1. Номинальное состояние каната				
$\bar{P}_e = P_e / P_c$ (№)	0,522 (2)	0,223 (1)	0,723 (1)	0,222 (1)
$\varepsilon \cdot 10^4$	52,7	73	73	73
$\theta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	~0	-107	0	-108
$\chi \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	125	125	~0	~0
$\zeta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	14,2	~0	~0	~0
$\max \sigma, H/мм^2$ (№)	1460 (2)	1459 (1)	1459 (1)	1460 (1)
$\min \sigma, H/мм^2$ (№)	472 (5)	-328 (14)	1338 (5)	151 (11)
$\bar{\Delta}$	0,230	-0,225	0,911	0,103
$\sigma, H/мм^2$	845	401	1301	400
2. Обрывы проволок № 8÷10 в пределах шага $h = 45$ мм				
\bar{P}_e (№)	0,389 (1)	0,218 (1)	0,618 (1)	0,221 (1)
$\varepsilon \cdot 10^4$	47,3	73	73	73
$\theta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	4,96	98,7	0	-105
$\chi \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	139	129	19,6	2,64
$\zeta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	18	4,19	10,2	1,37
$\max \sigma, H/мм^2$ (№)	1445 (19)	1463(1)	1459 (1)	1459 (1)
$\min \sigma, H/мм^2$ (№)	348 (5)	-239 (16)	1261 (5)	169 (15)
$\bar{\Delta}$	0,24	-0,163	0,864	0,116
$\sigma, H/мм^2$	701	392	1112	397
3. Обрывы проволок № 8÷10 в одном сечении				

\bar{P}_e (№)	0,369 (1)	0,204 (1)	0,603 (1)	0,205 (1)
$\varepsilon \cdot 10^4$	45,07	73	73	73
$\theta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	7,79	-101	0	-109
$\chi \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	141	128	23,7	1,4
$\bar{\zeta} \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	2,49	-3,16	13,6	-4,1
$\max \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	1430 (2)	1460 (1)	1460 (1)	1459 (1)
$\min \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	314 (5)	-266 (14)	1242 (15)	121 (12)
$\bar{\Delta} = \min \sigma / \max \sigma$	0,220	-0,182	0,851	0,0829
$\sigma, \text{Н/мм}^2$	665	367	1086	369

Таблица 3 – Параметры предельного упругого состояния каната 12(1–6) – 6(1+6) + о.с.; диаметр 9,3 мм

Расчетные параметры	Схемы растяжения			
	1	2	3	4
Номинальное состояние каната				
$\bar{P}_e = P_e/P_C$ (№)	0,612 (123)	0,301 (3)	0,669 (44)	0,308 (2)
$\varepsilon \cdot 10^4$	73,7	58,6	80,6	60
$\theta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	~0	-31,3	0	-32,1
$\chi \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	69,4	69,4	~0	~0
$\bar{\zeta} \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	21,8	~0	~0	~0
$\max \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	1330 (117)	1333 (3)	1305 (2)	1305 (2)
$\min \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	974 (123)	100 (87)	1230 (3)	232 (44)
$\bar{\Delta}$	0,73	0,075	0,94	0,174
$\sigma, \text{Н/мм}^2$	979	482	1071	493
Обрывы проволок № 44-57 в пределах шага $h = 66,5$ мм				
\bar{P}_e (№)	0,586 (123)	0,301 (3)	0,649 (44)	0,308 (2)
$\varepsilon \cdot 10^4$	72,9	58,8	80,7	61,2
$\theta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	0,14	-30,7	0	-30,4
$\chi \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	73,9	70,4	18,9	4,9
$\bar{\zeta} \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	22,3	-0,6	-5,8	-2,3
$\max \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	1329 (117)	1333 (3)	1329 (58)	1329 (2)
$\min \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	950 (123)	112 (87)	1189 (24)	291 (58)
$\bar{\Delta}$	0,71	0,084	0,93	0,219
$\sigma, \text{Н/мм}^2$	938	481	948	492
Обрывы проволок № 44-57 в одном сечении				
\bar{P}_e (№)	0,582 (123)	0,301 (5)	0,630 (44)	0,308 (3)
$\varepsilon \cdot 10^4$	72,6	58,8	80,7	60,7
$\theta \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	0,15	-30,7	0	-30,9
$\chi \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	74,5	70,5	12,0	2,96
$\bar{\zeta} \cdot 10^4, \text{рад/мм}$	24,1	1,3	-1,94	-0,5
$\max \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	1329 (123)	1333 (3)	1329 (14)	1329 (2)
$\min \sigma, \text{Н/мм}^2$ (№)	944 (24)	113 (87)	1204 (44)	272 (122)
$\bar{\Delta}$	0,71	0,085	0,906	0,205
$\sigma, \text{Н/мм}^2$	931	480	986	493

Выводы. Прочностные характеристики P_e (13) предельного упругого состояния канатов весьма существенно зависят от схемы нагружения, конструкции каната и наличия обрывов проволок. Их представление в табл. 2 и 3 в относительном измерении $\bar{P}_e = P_e/P_C$ по сути адекватно коэффициенту K в формуле (2). Главной причиной низких значений характеристик \bar{P}_e является неравномерность $\bar{\Delta}$ деформаций и напряжений растяжения проволок в канате. Это в первую очередь обуславливается деформацией θ кручения каната, во

вторую деформацией χ изгиба. Знак минус при $\bar{\Delta}$ означает, что проволоки указанного номера среди тех, которые в данном состоянии каната испытывают сжатие.

Значение \bar{P}_e для 2-ой и 4-ой схем растяжения значительно зависят от жесткости влияния G_{12} , с которой связана деформация кручения каната. Так для каната ϕ 5,15 мм при конструкции 1+6+12 жесткость $G_{12} = 1270$ кНмм и $\bar{P}_e = 0,222$. В случае конструкции 1–6+12 т.е. с противоположным направлением свивки слоев $G_{12} = 736$ кНмм и $\bar{P}_e = 0,47$.

Величины среднего условного напряжения σ показывают, что их уровень в предельном упругом состоянии канатов выше этого параметра при рабочих (эксплуатационных) нагрузках [1]. Это полезно учитывать при анализе нормативных запасов прочности для конкретных схем нагружения канатов.

Наличие обрывов проволок приводит к формированию жесткостей влияния (табл.1): продольно изгибных G_{13}, G_{14} ; крутильно изгибных G_{23}, G_{24} , а также изгибно-изгибной G_{34} . При растяжении канатов в состоянии с этими жесткостями возникают дополнительные деформации изгиба и кручения каната, а значит и деформации проволок как в сторону увеличения по сравнению с номинальным состоянием, так и в сторону уменьшения.

Характеристики \bar{P}_e в состояниях с обрывами проволок при 1-ой и 3-ей схемах уменьшаются. При 2-ой и 4-ой остаются практически неизменными, т.к. деформации кручения θ изменяются незначительно.

Для 3-ей схемы растяжения соотношение между характеристикой P_e предельного упругого состояния каната и характеристикой его несущей способности составляет $P_e = (0,7 \div 0,75)P_H$. Для других схем растяжения, связанных с кручением и изгибом, соотношение носит менее стабильный характер (зависит от жесткостей влияния и отношения диаметра барабана к диаметру каната).

Предлагаем на основе характеристик P_e растяжения каната по предельному упругому состоянию построить методику расчета канатов на прочность, которая будет иметь преимущества по сравнению с существующей, основанной на характеристике (2). Аргументы преимущества:

– Прочностные характеристики P_e непосредственно связаны со схемой нагружения каната.

– Значение P_e учитывает все геометрические характеристики одинарной и двойной свивки, а также деформативные свойства проволок.

– Характеристики P_e позволяют учитывать влияние обрывов проволок в процессе эксплуатации канатов как в пределах норм браковки, так и в направлении оптимизации норм.

Все характеристики P_e должны быть предварительно определены для типовых конструкций канатов в соотношениях к их суммарным разрывным усилиям. Это будет удобно для использования.

Наибольшая трудоемкость и ответственность при создании предполагаемой методики ляжет на пересчет обоснованных нормативных запасов прочности.

Список использованной литературы

1. Бережинский, В.И., Шатило, А.Н. Канаты шахтных подъемных установок. Университетская книга, Москва, Россия (2015), 232 с.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. Форт, Харьков, Украина (2007), 268 с.
3. DIN-Taschenbuch. Drahtseile: Normen. — Berlin-Koln: Beuth (1990), 360 s.
4. Чаюн И.М. Связь точности расчетной схемы и запасов прочности канатов Стальные канаты 9, Астропринт, Одесса, Украина (2013), с.126 – 141.
5. Чаюн, И.М. Несущая способность подъемных канатов и лент / И.М. Чаюн. – Одесса: Астропринт, 2003. – 233 с.
6. ГОСТ 12004-81 Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. Стандартиформ Москва, Россия (2009).
7. Чаюн, И.М. Обоснование повышения точности расчетной прочностной схемы подъемных канатов / И.М. Чаюн // Підйомно-транспортна техніка. — 2013. – №3.– С. 36 – 44.
8. Чаюн И.М. Вовк П.Е. Трение нити расположившейся на винтовой линии при растяжении на цилиндрической поверхности /И.М. Чаюн, П.Е Вовк // Підйомно-транспортна техніка. – 2019. – №2.– С. 75 – 82.

CALCULATION OF ROPES FOR STRENGTH BY THE EXTREME ELASTIC STATE

Chayun I. M., Vovk P. E.
Odessa National Polytechnic University

Annotation. A technique has been developed for the theoretical determination of the strength P_e and deformation characteristics of the

limiting elastic state of ropes for four loading schemes in the initial state, and also with taking into account the operational breakage of the wires. Two schemes are stretching with winding onto the drum with free suspension of the load and with the load in the guides, the other two schemes are stretching the straight rope without bending. As the ultimate elastic, is taken the state of the rope, in which one of the wires (or a group) reaches deformation of the limit of elasticity (yield). Tensile force P_e of the ultimate elastic state significantly depends on the loading scheme, rope design and the presence of wire breaks. For the studied loading schemes and various rope designs, the forces are presented in relative measurement $\bar{P}_e = P_e/P_C$, where P_C is the total breaking strength of the wire ropes. When stretching with a freely suspended load \bar{P}_e is 0,22 – 0,31 (lower values when stretched with a winding on the drum); when loaded in guides \bar{P}_e is 0,61 – 0,72. The main reason for the low values of \bar{P}_e characteristics is the unevenness of the tensile strains of the wires in the rope. This is primarily due to the torsional deformation θ of the rope, to the second due to bending deformation χ .

The values of the average conditional stress σ show that their level in the ultimate elastic state of the ropes is higher than this parameter at working (operational) loads. This is useful to consider when analyzing standard safety factors for specific rope loading schemes.

The presence of wire breaks leads to the formation of stiffness effects: longitudinally bending G_{13}, G_{14} ; torsionally bending G_{23}, G_{24} , as well as bending-bending G_{34} . When the ropes are stretched in a state with these stiffnesses, additional bending and torsion deformations of the rope occur, and, therefore, deformations of the wires both in the direction of increase compared to the nominal state, and in the direction of decrease. The characteristics of \bar{P}_e in states with wire breaks under tension in the guides decrease, and with a freely suspended load they remain almost unchanged, because torsional strains of the ropes change insignificantly.

Key words: rope, yield strength, elastic state, stress, strain, friction.