

Анализ напряженного состояния кабелей управления с учетом контактной нагрузки

Л. М. МАМАЕВ

Днепродзержинский государственный технический университет

Получены зависимости по определению напряжений в кабелях управления с учетом контактной нагрузки.

Одержані залежності по визначенню напруження в кабелях управління з урахуванням контактної навантаження.

Dependences are got on determination of tensions in the cables of management taking into account the contact .

Введение. Одной из отличительных особенностей кабелей управления – это наличие токоведущих жил, состоящих из медных проволок, механические характеристики которых значительно уступают стальным проволокам канатов. Токоведущие жилы одновременно выполняют функции связи с объектами и воспринимают механические нагрузки.

Если вопросы расчета и конструирования стального каната в достаточной мере исследованы многими авторами, то для кабелей управления требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Постановка задачи и решение. Представим кабель, состоящий из 4 слоев жил, каждый из которых свит под своим углом α (рис. 1).

Количество жил в слоях: $4+10+16+22=52$.

Диаметр жилы обозначим δ . Радиус первого

слоя: $r_1 = \delta \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Радиусы второго и последующих слоев

$$r_3 = \delta \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 2 \right), \quad r_4 = \delta \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 3 \right) \text{ и т.д.}$$

Внутренний и внешний радиусы обозначим

$$r = \delta \left(\frac{\sqrt{2} + 7}{2} \right); \quad R = r + H.$$

Эти выражения приближенные.

Более точные значения получены в [1,5] из

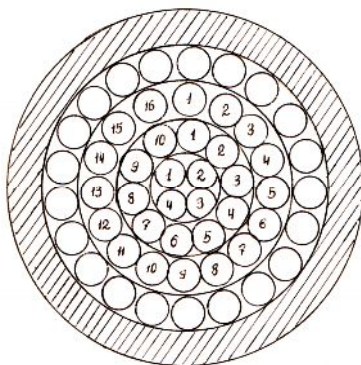


Рис. 1. Размещение жил в кабеле по слоям

детального геометрического анализа условий контакта проволок одного слоя (тангенциального контакта). Различие состоит в том, что в поперечном сечении профиль жилы имеет форму не круга, а эллипса и тем, что окружность, на которой лежат точки контакта, не совпадают с окружностью, проходящей через центры жил.

$$r_1 = \frac{\delta}{2} \left(\sin \Delta \cdot \sqrt{1 + \cos^2 \Delta \operatorname{tg}^2 \alpha_3} \right),$$

где

$$\tilde{n} \operatorname{tg} 2\Delta = \frac{\operatorname{tg}^2 \beta + \cos \frac{2\pi}{m_i}}{\sin \frac{2\pi}{m_i}}.$$

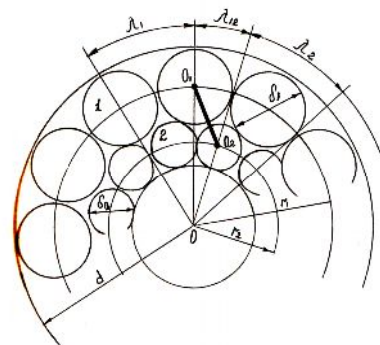


Рис. 2. Определение радиуса для данного слоя жилы

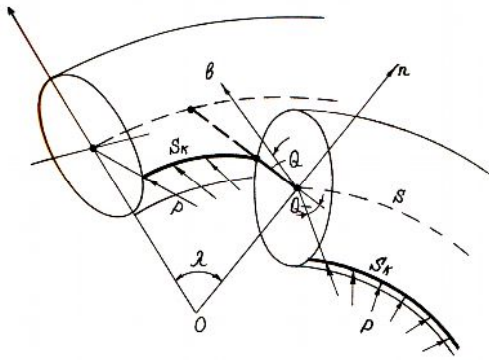
Соседние жилы одного слоя имеют непрерывный контакт вдоль винтовой линии. Радиус линии контакта равен $r_k = r \cos \Delta$.

Угол наклона линии контакта $\operatorname{tg} \alpha_k = \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \Delta$.

Угол, образованный линией действия контакта силы с осью (рис. 3), $\cos \theta = \frac{r}{\delta} \cdot \frac{\sin 2\Delta}{\cos \alpha}$.

Рассмотрим теперь контакт между жилами различных слоев – нормальный контакт.

Жилы различных слоев между собой контактируют лишь в отдельных точках (т.н. точечный контакт) (см. рис. 4).



Пусть слой с номером i содержит m_i жил, имеет радиус r_i и угол свивки α_i . Внутренний по

Рис. 3. Ориентация тангенциальных контактных сил

отношению к нему $(i-1)$ слой характеризуется параметрами m_{i-1} , α_{i-1} , r_{i-1} .

В данном сечении жилы i - того слоя (№ 0) имеет с жилой $(i-1)$ го слоя (№ 1). Далее жила № 0 идет свободно до некоторого сечения, где она контактирует с проволокой № 2 внутреннего слоя. Расстояние между этим сечениями $-\delta_v$. Длина пролета жилы от одного контакта до другого - S_v . Полярный угол между первой точкой контакта и проекцией на это же сечение второй точки контакта - v .

Для винтовой линии $x = r \cdot \phi \cdot \text{ctg} \alpha$.

Запишем величину для жилы № 0 и жилы № 2

$$\begin{cases} \delta_v = r_i \text{ctg} \alpha_i, \\ x_v = r_i - l \left(v + \frac{2\pi}{m_i - 1} \right) \text{ctg} \alpha_i - 1. \end{cases}$$

Отсюда легко получить угол пролета и длину пролета между двумя очередными точками жилы № 0

$$v = \frac{2\pi}{m_{i-1}} \cdot \frac{r_{i-1} \text{ctg} \alpha_{i-1}}{r_i \text{ctg} \alpha_i - r_{i-1} \text{ctg} \alpha_{i-1}}; \quad S_v = \frac{r_i v}{\sin \alpha_i}.$$

Если использовать шаг свивки $h = 2\pi r \text{ctg} \alpha$,

$$v = \frac{2\pi}{m_{i-1}} \cdot \frac{h_{i-1}}{R_i - h_{i-1}}.$$

Число точек контакта на шаге свивки

$$n = \frac{2\pi}{v} = m_{i-1} \frac{h_i - h_{i-1}}{h_{i-1}}.$$

Заметим, что знак «-» в знаменателе этих формул может смениться на «+» если α_i и α_{i-1} имеют разные знаки или при $h_i < h_{i-1}$ даже если α_i , α_{i-1} одного знака. Совершенно аналогично получим формулы для контакта жилы i -того слоя с жилами $(i+1)$ слоя – внешний контакт.

$$v = \frac{2\pi}{m_{i-1}} \cdot \frac{r_{i+1} \text{ctg} \alpha_{i+1}}{r_i \text{ctg} \alpha_i + r_{i+1} \text{ctg} \alpha_{i+1}} = \frac{2\pi}{m_{i+1}} \cdot \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}.$$

Знак «-» меняется на знак «+» если $h_{i+1} > h_i$, или α_i и α_{i+1} имеют разные знаки. Заметим, что если жилы навивки двух смежных слоев совпадают, то $v = \infty$, т.е. 2 жилы испытывают линейный контакт.

Таким образом, жилы первого слоя испытывают линейный тангенциальный контакт и точечный внешний контакт. Жилы 2-го и 3-го слоя испытывают линейный тангенциальный контакт, точечный внутренний и точечный наружный контакт. Жилы 4-го слоя испытывают линейный тангенциальный контакт, точечный контакт с внутренним слоем и линейный контакт с оболочкой. Для 2-го и 3-го слоя периодичность наружного и внутреннего контакта не совпадают.

Ранее [1] усилия в жиле кабеля были определены с точностью до контактной реакции f_n . Для ее определения используем теорему Кастильяно. В соответствии с ней, частная производная от потенциальной энергии деформации по обобщенной силе равна обобщенному перемещению системы в направлении действия этой силы.

Запишем потенциальную энергию деформации для одной жилы:

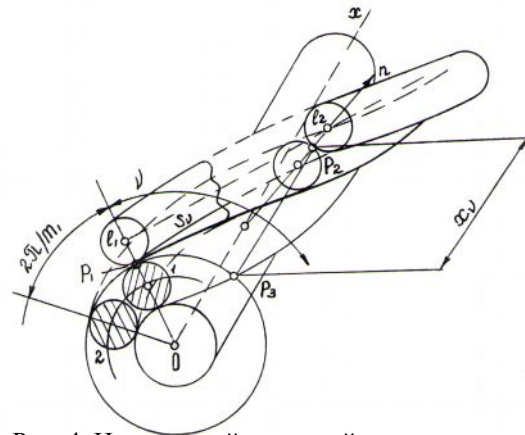


Рис. 4. Нормальный точечный контакт жил

$$\begin{aligned} V_s &= \int_0^s \frac{1}{2} (P_t \varepsilon_t + L_t \tilde{t} + L_b \cdot \tilde{b} + L_n \cdot \tilde{n}) = \\ &= \int_0^s \frac{1}{2} \left(P_t^2 / EF + \frac{L_t^2}{GI_p} + \frac{L_b^2 + L_n^2}{EI} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Работой поперечных сил можно пренебречь. Введем удельную потенциальную энергию, равную ее величине на длине жилы, отнесенной к единице длины кабеля: $V = V_s / x_s$.

Частные производные $\partial V_s / \partial P_s$ и $\partial V_s / \partial L_s$ равны соответственно продольному U и угловому V перемещениям жилы в кабеле. Поскольку в расчете участвует удельная потенциальная энергия, отнесенная к единице длины кабеля, то эти производные будут равны соответствующим деформациям

$$\frac{\partial V}{\partial P_x} = \varepsilon_x; \quad \frac{\partial V}{\partial L_x} = \theta_x.$$

Поперечной податливостью кабеля можно пренебречь, следовательно

$$\frac{\partial V}{\partial P_x} = 0.$$

Подставляя в (1) усилия P_t, L_t, L_b, L_n через P_x, L_x, \bar{f}_n , получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_n \delta_{11} + P_x \delta_{21} + L_x \delta_{31} &= 0; \\ \bar{f}_n \delta_{12} + P_x \delta_{22} + L_x \delta_{32} &= \varepsilon_x; \\ f_n \delta_{13} + P_x \delta_{23} + L_x \delta_{33} &= \theta_x. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{r^2}{\cos \alpha} \left(\frac{1}{EF} + \frac{4r^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}{GI_p} + \frac{r^2 \cos^2 2\alpha}{EI \sin^4 \alpha} \right); \\ \delta_{22} &= \frac{\cos \alpha}{EF} + \left(\frac{\sin^2 \alpha}{GI_p} + \frac{\cos \alpha}{EI} \right) \frac{r^2}{\cos \alpha}; \\ \delta_{33} &= \left(\frac{\cos^2 \alpha}{GI_p} + \frac{\sin^2 \alpha}{EI} \right) \frac{1}{\cos \alpha}; \\ \delta_{12} = \delta_{21} &= \frac{r}{EI} - r^3 \left(\frac{2}{GI_p} + \frac{\cos 2\alpha}{EI \sin^2 \alpha} \right); \\ \delta_{23} = \delta_{32} &= \left(\frac{1}{GI_p} \frac{1}{EI} \right) r \sin \alpha; \\ \delta_{31} = \delta_{13} &= 2r^2 \left(\frac{\operatorname{ctg} 2\alpha}{EI} - \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{GI_p} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Систему (2) можно разрешить относительно P_x, L_x и представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= g\varepsilon_x + c\theta_x; \\ L_x &= c\varepsilon_x + \theta_x. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Коэффициенты a, b, c выражаются формулами

$$\left. \begin{aligned} a &= E \cos^3 \alpha + EI \frac{\sin^4 \alpha}{r^2} \cos^3 \alpha + \\ &+ GI_p \frac{\sin^6 \alpha}{r^2} \cos^2 \alpha; \\ b &= EFr^2 \cos \alpha \sin^2 \alpha + GI_p \cos^7 \alpha + \\ &+ EI(1 + \cos^2 \alpha) \sin^2 \alpha \cos \alpha; \\ c &= EFr \cos^2 \alpha \sin \alpha + GI_p \frac{\cos^4 \alpha}{r} \sin^3 \alpha - \\ &- EI(1 + \cos^2 \alpha) \frac{\cos^2 \alpha}{r} \sin^3 \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Как уже отмечалось ранее [1] усилия \bar{T} и \bar{M} , относящиеся ко всему сечению кабеля, получим суммированием по жилам и оболочке усилий \bar{P}^i и \bar{L}^i . Обозначая, как и раньше, относящиеся к оболочке величины верхним индексом 0, запишем

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \left(\sum_i P_x^i \right) + P_x^0 = \sum_i (a_i \varepsilon_x + c_i \theta_x) + \\ &+ (EF)^0 \varepsilon_x = A\varepsilon_x + C\theta_x; \\ M_x &= \left(\sum_i L_x^i \right) + L_x^0 = \left(\sum_i C_i \varepsilon_x + b_i \theta_x \right) + \\ &+ (GI_p)^0 \theta_x = C\varepsilon_x + B\theta_x. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь коэффициенты A, B, C – агрегатные коэффициенты жест-кости кабеля.

$$A = \left(\sum_i a_i \right) + (EF)^0; \quad B = \left(\sum_i b_i \right) + (GI_p)^0; \quad C = \sum_i c_i. \quad (7)$$

Т.к. кабель испытывает еще и изгиб относительно оси y , то запишем также изгибающий момент M_y

$$M_y = g_0 \tilde{v}_x. \quad (8)$$

Коэффициент g_0 – это изгибная жесткость кабеля. Изгибающую жесткость кабеля с высокой точностью можно представить суммой изгибающих жесткостей составляющих его элементов, т.е.

$$g_0 = \sum_i (EI) + (EI)^0. \quad (9)$$

Усилия T_x, M_x, M_y должны подчиняться уравнению равновесия

$$\cos \beta M_y = \sin \beta M_x - \frac{r_0}{\cos \beta} T_x. \quad (10)$$

Подставляя сюда выражения для усилий (6) и (8), получим

$$\begin{aligned} \cos \beta g_0 \tilde{v}_x &= \sin \beta (C\varepsilon_x + B\theta_x) - \\ &- \frac{r_0}{\cos \beta} (A\varepsilon_x + C\theta_x). \end{aligned} \quad (11)$$

Теперь $\varepsilon_x, \theta_x, \tilde{v}_x$ заменим на их выражения через $\varepsilon_r, \varepsilon_\xi$ в результате чего получим соотношение, связывающее эти два параметра

$$D\varepsilon_\xi + G\varepsilon_r = 0. \quad (12)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} D &= A \cos \beta - \frac{C}{r^0} \cos 2\beta \sin \beta - \\ &- \frac{B \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{r_0^2} \sin^2 \beta \cos \beta; \\ G &= A \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} - 2 \frac{C}{r_0} \sin^3 \beta + \\ &+ \frac{B \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{r_0^2} \sin^2 \beta \cos \beta. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Теперь можно выразить ε_r через ε_ξ

$$\varepsilon_r = -\frac{D}{G} \varepsilon_\xi. \quad (14)$$

Выводы

Подводя итог, получаем, что расчет напряжений в жилах кабеля управления должен проводиться со следующим алгоритмом:

1. Подсчитываются жесткости D и G .
2. По заданной величине осевой деформации ε_ξ подсчитывается деформация радиального сужения ε_r .
3. Имея $\varepsilon_\xi, \varepsilon_r$, подсчитываем деформации кабеля в локальной системе координат (x, y, z) , т.е. $\varepsilon_x, \theta_x, \tilde{v}_x$, а затем деформации каждой жилы $\varepsilon_i, \tilde{t}, \tilde{v}, \tilde{n}$.

4. По найденным в каждой жиле деформациям рассчитываем напряжения от растяжения, изгиба и кручения, а потом уже интенсивность напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко М. Ф. Стальные подземные канаты. Изд-во «Техніка», 1966.
2. Глушко М. Ф., Мамаев Л. М., Шахназарян Э. А. К расчету стальных канатов и бронированных кабелей в неметаллической упругой оболочке. Сб. «Стальные канаты» № 5, 1968.
3. Мамаев Л. М., Кабаков А. М. Определение дополнительных усилий в элементах ошлангованных канатов с упругой оболочкой покрытия при переходном процессе. «Математичне моделювання». Науковий журнал, № 2 (25), 2011 р., С. 29—31.
4. Мамаев Л. М. Определение напряжений изгиба в проволоках кабеля управления с учетом изгибной жесткости арматуры. Сб. научных трудов ДГТУ и КГТУ, вып. 14, 2013.
5. Мамаев Л. М., Костюченко В. А., Самойленко Д. А. Расчет геометрических параметров кабелей повышенного удлинения. «Подъемно-транспортная техника» Научно-технический журнал, Днепропетровск, 2003, С. 86—89.
6. Мамаев Л. М., Кабаков А. М., Самойленко Д. А. К расчету оптимальных параметров токоведущих жил бронированных кабелей. Сб. научных трудов Керченского государственного морского технологического университета. Керчь, 2003, вып. 5, С. 118—126.

пост.30.12.2013

Дослідження НДС стрічок на барабанах потужних конвеєрів металургійного комплексу

Д. Л. КОЛОСОВ*, О. І. БІЛОУС

*Національний гірничий університет, Дніпродзержинський державний технічний університет

Досліджено напружено-деформований стан оболонки гумотросової стрічки навантаженої нормальними силами тиску з боку барабана. Встановлена залежність коефіцієнта концентрації напружень гумової оболонки стрічки від її геометричних параметрів.

Исследовано напруженно-деформированное состояние оболочки резинотросовой ленты нагруженной нормальными силами давления со стороны барабана. Установлена зависимость коэффициента концентрации напряжений резиновой оболочки ленты от её геометрических параметров.

The stress-strain state of the shell rubber-tape loaded by normal pressure from the drum. The dependence of the stress concentration factor of the rubber sheath ribbon on its geometrical parameters.

Вступ. Металургійне виробництво – базова галузь економіки України. В цій галузі здійснюється переміщення значних обсягів матеріалів. Сучасні системи постачання шихтових матеріалів, включно і система постачання шихти в найбільшу в Україні доменну піч №9 «Арселор Миттал Кривий Ріг» [1], базуються на конвеєрному транспорті. В порівнянні зі скіповою системою подачі шихти, конвеєрна система має ряд переваг. Питомі капітальні і експлуатаційні витрати менші на 15—20%. Продуктивність системи значно менша, вона більш проста. Така система допускає надійне узгодження роботи усіх складових системи підготовки та подачі шихти. Нею можна керувати без участі людини, за допомогою OEM.

Основна частина. Основний колошниковий конвеєр (рис.1) має довжину у декілька сотень метрів. Він обладнаний розвантажувальним барабаном 1 та барабаном натягнення 2, приводними барабанами 3 та 4. Барабани огинаються стрічкою 5. Стрічка спирається на ролики 6. Шихтовий матеріал на стрічку подається з ємностей 7. Конвеєр має горизонтальну та похилу

ділянки, працює безперервно. Розвантажувальний барабан 1 віднесений від привода до осі печі. Привод встановлений на спеціальній конструкції.

На стрічку конвеєра діють значні сили розтягу. Для забезпечення достатньої міцності стрічки її виготовляють з тросів запресованих в гумову оболонку.

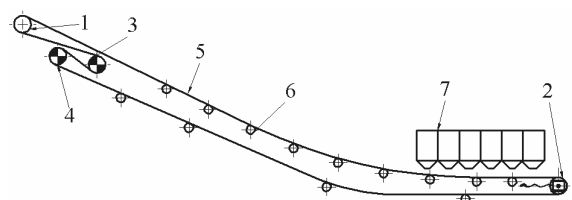


Рис. 1. Схема конвеєра подачі шихти на колошник доменної печі

Шихтові матеріали подаються конвеєром згідно із заданою програмою. Завантажують руду, кокс, агломерат порціями з визначеними інтервалами. Значна