

УДК 621.86.065:539.38

А.В. Непомнящий, аспирант

Одесский национальный политехнический университет

просп. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

E-mail: nepalvic@ukr.net

ОСТАТОЧНЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ ОТ СВИВОЧНЫХ НАТЯЖЕНИЙ

Разработана методика определения остаточных усилий в витых изделиях из проволок разномодульных по упругости, связанных со свивочным натяжением элементов. Получены соотношения натяжений, при которых обеспечивается отсутствие остаточных усилий в изделии после разгрузки.

Ключевые слова: статическая неопределимость, остаточные усилия, кабель, провод.

Введение. Многослойные провода, каротажные кабели и вообще изделия из витых проволок представляют стержневые статически неопределимые конструкции. Это предопределяет возможность возникновения остаточных усилий в их стержнях в процессе изготовления и нагружения. Стержнями являются проволоки, которые спирально укладываются вдоль оси изделия, а в поперечном сечении образуют концентрические слои (рисунок 1).

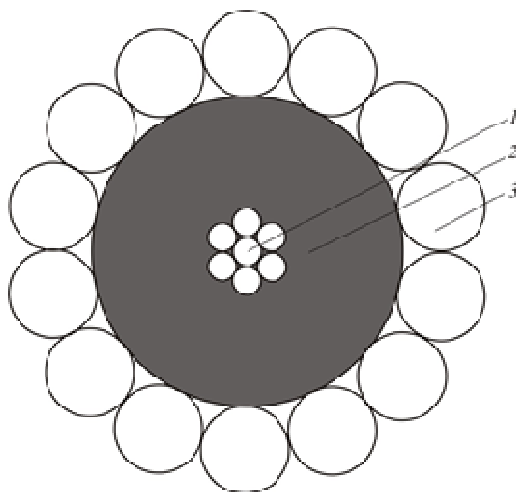


Рисунок 1 – Сечение кабеля:

- 1 – токопроводящая жила; 2 – слой изоляции;
3 – слой брони

Качественная свивка любых изделий из витых проволок возможна только при достаточном уровне натяжения их элементов, причем предъявляется требование одинаковости натяжения [1]. Отклонение от одинаковости натяжений – главная из причин низкого качества: непрямолинейность в свободном состоянии, раскручиваемость и др. дефекты.

Применительно к стальным канатам, состоящим из проволок одинакового модуля упругости, связь между свивочным натяжением элементов (проволок, прядей) и последующим напряженно-деформированным состоянием рассмотрена в [2, 3].

Цель работы. Создание методики расчета остаточных усилий, обусловленных свивочным натяжением элементов, в изделиях из разномодульных по упругости проволок: многослойных биметаллических проводов, каротажных кабелей, а также оптимизация свивочного натяжения по критерию минимизации остаточных усилий, связанных с разгрузкой после изготовления.

Содержание исследования. Расчетная схема послесвивочной разгрузки изделия из витых проволок показана на рисунке 2. Под стержневыми элементами 1, 2, ..., i, ..., s понимаем группы проволок одного слоя с одинаковым модулем упругости, где 1 – центральная проволока, например, токопроводящей жилы кабеля; s – количество элементов. Углы свивки $\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_s$ слоев

$$\alpha_i = \arctg \frac{2\pi r_i}{h_i}.$$

Остальные обозначения рисунке 2 имеют такой смысл: $\Delta_{H1}, \Delta_{H2}, \dots, \Delta_{Hi}, \dots, \Delta_{Hs}$ – удлинение элементов на шаге свивки, вызванные со свивочным натяжением; Δ – укорочение изделия на шаге свивки (например кабеля) после разгрузки по усилию P , которое определяется суммарным натяжением элементов; $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_s$ – остаточные изменения длин элементов после разгрузки (условно все они изображены как удлинения – это однообразное предположение не влияет на действительное распределение остаточных растянутых – сжатых элементов).

Положение узла H (рисунок 2) отвечает послесвивочному состоянию начала разгрузки. Положение узла K соответствует окончанию разгрузки. Вне зависимости от деформированного состояния проволок разгрузка представляет процесс упругого деформирования под действием суммарного натяжения элементов P . Основание – теорема о разгрузке [4]:

$$P = \sum_{i=1}^s P_i m_i \cos \alpha_i, \quad (1)$$

где P_i натяжение проволоки i -го элемента; m_i – количество проволок в i -ом элементе.

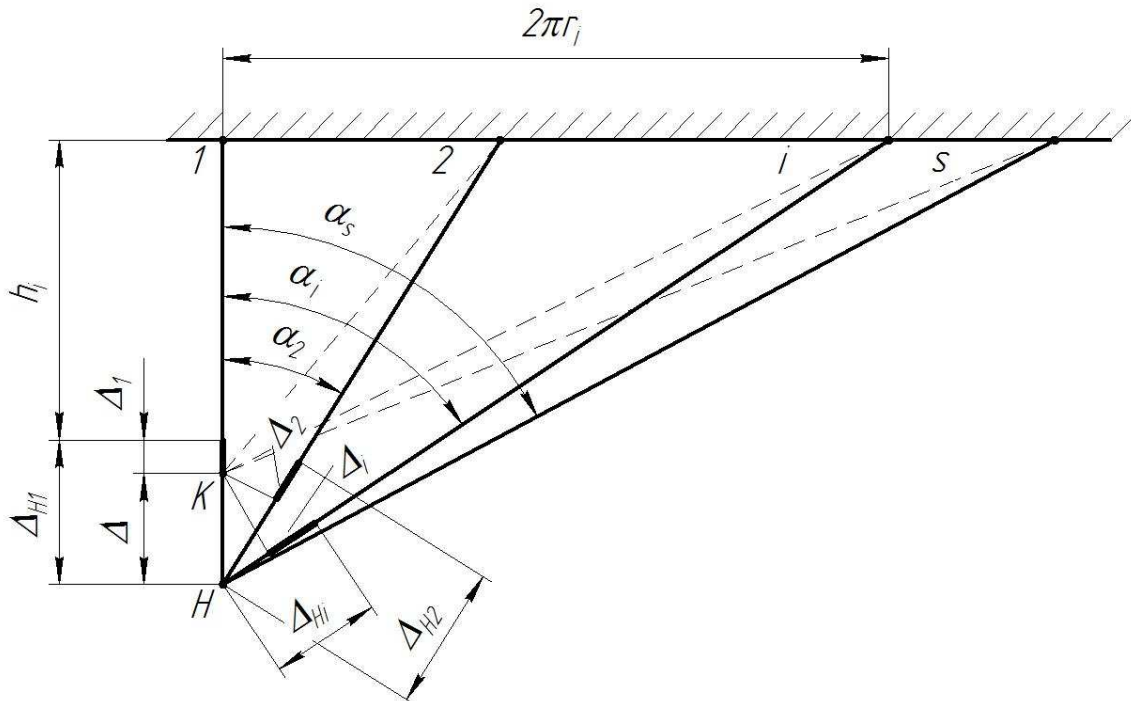


Рисунок 2 – Расчетная схема разгрузки

В процессе разгрузки следует выделять собственную разгрузку каждого элемента и разгрузку изделия (кабеля, провода) в целом. После разгрузки кабеля одни элементы, недоразгрузившись, останутся растянутыми, а другие, получив полную собственную разгрузку, окончательно окажутся сжатыми. Относительно таких элементов принимаем упрощающее предположение: считаем, что усилия сжатия не превышают критических, при которых происходит потеря устойчивости.

Уравнение совместности перемещений (рисунок 2) от положения H до K в процессе разгрузки и совместности деформаций имеют вид [2]

$$\Delta_i = \Delta_{Hi} - \Delta \cos \alpha_i ; \tag{2}$$

$$\epsilon_i = \epsilon_{Hi} - \cos^2 \alpha_i , \tag{3}$$

где ϵ_i – остаточная упругая деформация проволоки i -го элемента в состоянии после разгрузки, которой пропорционально остаточное усилие N_i ; ϵ_{Hi} – деформация предварительного свивочного натяжения; ϵ – деформация разгрузки кабеля. Уравнение статики в состоянии после разгрузки

$$\sum_{i=1}^s N_i m_i \cos \alpha_i = 0. \tag{4}$$

На основе теоремы о разгрузке, т.е. считая деформирование каждого элемента упругим, уравнение (4) запишем так:

$$\sum_{i=1}^s \epsilon_i E_i A_i m_i \cos \alpha_i = 0, \tag{5}$$

где $E_i A_i$ – продольная жесткость проволоки i -го элемента.

Решая совместно (5) и (3), получаем выражение деформации разгрузки кабеля

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^s \epsilon_{Hi} E_i A_i m_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^s E_i A_i m_i \cos^3 \alpha_i}. \tag{6}$$

Остаточные усилия в проволоке i -го элемента

$$N_i = P_i - \frac{\sum_{i=1}^s m_i P_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^s m_i E_i A_i \cos^3 \alpha_i} E_i A_i \cos^2 \alpha_i. \quad (7)$$

Проведенные исследования на основе (7) показали, что условие одинаковости натяжений элементов, указанное в [1], не обеспечивает полного отсутствия остаточных усилий, связанных со свивочным натяжением. Нулевые остаточные усилия возможны только при условии одинакового натяжения во всех проволоках одного элемента (слоя), но между элементами натяжения должны быть разными, зависящими от конструктивных особенностей элемента и модуля упругости его проволок. Это требование является общим для любых изделий из свитых проволок: канатов, многослойных проводов ЛЭП, каротажных кабелей.

Применительно к биметаллическому многослойному проводу отсутствие остаточных усилий после разгрузки от свивочного натяжения требует такого соотношения натяжений проволок в слоях

$$P_i = K \bar{E}_i \delta_i^2 \cos^2 \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, s. \quad (8)$$

где K – коэффициент свивочного натяжения, $\bar{E}_i = E_i / E$ – относительный модуль упругости проволок i -го элемента; E_i и E – абсолютные значения модулей упругости проволок i -го элемента и проволок элемента с наименьшим модулем упругости; δ_i – диаметр проволок i -го элемента.

В таблице 1 приведены результаты расчета натяжений P_i и остаточных усилий N_i в проволоках сталеалюминиевого провода диаметром 7 мм, конструкции $(1+6)_{cm} + (12+18)_{al}$.

Таблица 1 – Зависимость остаточных усилий и напряжений в проволоках провода от их свивочного натяжения

№ i -го слоя проволок, материал	Провод в состоянии 1			Провод в состоянии 2		
	Натяжения проволок при свивке P_i, H	Остаточное усилие в проволоке N_i, H	Остаточные напряжения $\sigma_i, МПа$	Натяжение проволок при свивке P_i, H	Остаточные усилие в проволоке N_i, H	Остаточные напряжения $\sigma_i, МПа$
1, сталь	30	- 39,026	- 49,715	100	0	0
2, сталь		- 34,986	- 44,568	94,148	0	0
3, алюминий		8,338	10,622	31,382	0	0
4, алюминий		8,338	10,622	31,382	0	0

Параметры свивки и упругие характеристики проволок взяты из [5]: диаметры проволок $\delta = 1$ мм; углы свивки $\alpha = 14^\circ$; модули упругости стальных и алюминиевых проволок соответственно $E_{cm} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $E_{al} = 0,7 \cdot 10^5$ МПа. Расчёты выполнены для двух состояний: 1-е состояние: одинаковое натяжение всех проволок $P = 30$ Н; 2-е состояние: натяжения, соответствующие (8).

Аналогичное исследование проведено для каротажного кабеля применительно к сечению (рисунк 1). Параметры кабеля взяты из [6]: диаметры проволок медной жилы $\delta_m = 0,35$ мм; угол свивки $\alpha_m = 19^\circ$; модуль упругости $E_m = 1,3 \cdot 10^5$ МПа; диаметр проволок слоя брони $\delta_b = 1,1$ мм; угол свивки $\alpha_b = 22^\circ 50'$; количество проволок $m_b = 14$; модуль упругости $E_c = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Для обеспечения отсутствия остаточных усилий в токопроводящей жиле после её изготовления соотношение натяжений проволок должно соответствовать условию (8). Отсутствие остаточных усилий одновременно в проволоках жилы $(1+6)$ и брони требует выполнения двух условий. В процессе покрытия слоем брони токопроводящей жилы кабеля её натяжение

$$P_{жс} = K_2 \sum_{i=1}^2 \bar{E}_i m_i \delta_i^2 \cos^3 \alpha_i, \quad (9)$$

а натяжения проволок брони

$$P_b = K_2 \bar{E}_b \delta_b^2 \cos^2 \alpha_b. \quad (10)$$

В таблиці 2 приведені результати розрахунку натяжених P_i і зависячих від них остаточних сил N_i в проволочках каротажного кабелю КОБДФ – 6 (рисунок 1) для двох состояний.

Таблиця 2 – Зависимость остаточных усилий и напряжений в проволочках кабеля от их свивочного натяжения

№ слоя 1, 2 проволочек в жиле и слоя 3 проволочек брони	Кабель в состоянии 1			Кабель в состоянии 2		
	Натяжение проволочек и жилы (1+6) P_i, H	Остаточные усилия в проволочках и жиле N_i, H	Напряжения в проволочках от остаточных усилий $\sigma_i, МПа$	Натяжения проволочек и жилы (1+6) P_i, H	Остаточные усилия в проволочках и жиле N_i, H	Напряжения в проволочках от остаточных усилий $\sigma_i, МПа$
Первая свивочная операция, т.е. свивка жилы (1+6)						
1	5 (проволок)	-0,76436	-7,948628	3,67	0	0
2		0,08728	0,907676	3,285	0	0
Вторая свивочная операция, т.е. повив изолированной жилы слоем брони из 14 проволочек						
жила	35 (жилы)	-28,638		44,63 (жилы)	0	0
1	5,764	-5,932	-61,68	7,35038	0	0
2	5,153	-4,002	-41,62	6,57128	0	0
3	140	2,199	2,315	99,61	0	0

Примечание: 1-е состояние: при свивке медной жилы (1+6) натяжения всех её проволочек произвольные $P_i = 5H$; при повиве жилы её натяжение $P_{жс} = 35H$, а натяжения проволочек брони $P_6 = 140H$; 2-е состояние: натяжение элементов в соответствии с условиями (8–10).

Выводы. Статическая неопределённость витых проволочных изделий (канатов, кабелей и т.п.) предопределяет возможность возникновения остаточных усилий, связанных с технологическим и эксплуатационным деформированием. Разработанная методика позволяет вычислять и рационально управлять уровнем остаточных усилий, обусловленных свивочным натяжением элементов.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Букштейн М.А. Производство стальных канатов / М.А. Букштейн. — М.: Металургиздат, 1963. — 330 с.
2. Чаюн И.М. Связь свивочного натяжения элементов каната с его последующим деформированно-напряженным состоянием / И.М. Чаюн // Стал. канаты. — Одесса: Астропринт, 2005. — Вып. 4. — С. 14–24.
3. Чаюн И.М. Связь предсвивочного натяжения элементов каната с его остаточным напряженным состоянием / И.М. Чаюн, О.А. Пышняк // Стал. канаты. — Одесса: Астропринт, 2009. — Вып. 7. — С. 128–135.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.
5. Глушко М.Ф. Расчет канатов и биметаллических тросов линий электропередач с учетом температурных воздействий / М.Ф. Глушко, В.Ф. Волоконский, Л. М. Мамаев // Стал. канаты. — К.: Техніка, 1968. — Вып. 5. — С. 157–161.
6. Глушко М.Ф. Механический расчет и конструирование бронированных кабелей / М.Ф. Глушко, Л.М. Мамаев // Стал. канаты. — К.: Техніка, 1970. — Вып. 7. — С. 52–60.

Поступила в редакцию 1.03.2014 г.

Непомнящий О.В. Залишкові зусилля в елементах кабелів та проводів, пов'язані з їх звивальним натяганням

Розроблена методика визначення залишкових зусиль в витих виробках із дротів різномодульних по пружності, пов'язаних зі звивальним натяганням елементів. Одержані співвідношення натягань, за яких забезпечується відсутність залишкових зусиль в готовому виробі після розвантаження.

Ключові слова: статична невизначуваність, залишкові зусилля, кабель, провід.

Nepomnyashchiy A.V. The remanent strain in elements of cords and wires, which are connected with twisting tension

The methodology of the definition of remanent strain in the twisted items made of different modular wires which are connected with twisting tension of elements, is developed. Relations of the tension, by which the absence of remanent strains in the items after the relieving are secured, are obtained.

Keywords: static indeterminacy, remanent strain, cable, wire.