

УДК 621.86

©Фидровская Н.Н., Ломакин А.А.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПРИ НАБЕГАНИИ НА БЛОКИ И БАРАБАНЫ

### 1. Постановка проблемы

Тяжело представить развитие основных отраслей промышленности без применения стальных канатов. В горнодобывающей промышленности стальной канат является основным тяговым звеном, которое обеспечивает доставку полезных ископаемых на поверхность. Работа машиностроительных и металлургических предприятий с их средствами механизации немыслима без использования стальных канатов. Для большинства конструкций грузоподъемных и строительных машин стальной канат является неотъемлемой и важнейшей деталью. Современный уровень развития техники предъявляет все новые и новые требования к повышению прочности, надежности и долговечности стальных канатов. Одним из мест концентрации напряжений в канате являются участки набегания каната на блоки и барабаны. Так как в этих местах возникают местные дополнительные напряжения, существенно влияющие на усталостную и разрывную прочность каната.

Исследованием вопросов возникновения дополнительных напряжений в элементах канатов занимались представители многих отечественных и зарубежных школ, среди них: В.А. Малиновский [1, 5], И.Ф. Никитин [2-4], М.Ф. Глушко [5], С.Т. Сергеев [6-8], Ф.В. Флоринский, Е.С. Почтаренко, К. Шмидт [9], Г. Шиффнер [10], Дж. Бенойт, К. Фейрер, У. Эрнст и другие.

### 2. Основной материал

В литературе вопросу о дополнительных напряжениях уделяется достаточно внимания. При этом практически все авторы рассматривали винтовой элемент в канате как гибкую нить на шероховатой поверхности (сердечнике), а в качестве предельного критерия принимали силу трения скольжения на этой поверхности. Для определения дополнительных напряжений разные авторы предлагали следующие формулы:

Малиновский В. А. [1]  $\max \sigma_{\partial} = \Delta t_0 / f_i$ ,

где  $\Delta t_0$  – избыточное натяжение;

$f_i$  – площадь сечения винтового элемента.

Но данная формула применима только для спиральных канатов, а для канатов двойной свивки дает среднее дополнительное напряжение по сечению пряди.

Никитин И.Ф. [2, 3] 
$$\sigma_{\partial} = \sigma_p \left( e^{\mu \left[ \frac{r \cos^2 \alpha}{R \sin \alpha} + \left( \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha \right]} - 1 \right);$$

Глушко М.Ф. [5]	$\sigma_{\delta} = \sigma_p \left( e^{\mu \frac{(x-l) \sin^2 \alpha}{r \cos \alpha}} - 1 \right);$
Сергеев С. Т. [6, 7, 8]	$\sigma_{\delta} = \sigma_p \cdot \left( e^{\frac{1}{\rho}(x-l)} - 1 \right);$
Бенойт [1]	$\sigma_{\delta} = \sigma_p \cdot \left( e^{\mu \frac{\delta}{2} \sin \alpha} - 1 \right); \quad \sigma_{\delta} = \pm \mu \frac{\delta}{2} \sigma_p \cdot \sin \alpha;$
Исааксен [1]	$\sigma_{\delta} = \mu \sigma_p \pi \sin \alpha;$
Эрнст [1]	$\sigma_{\delta} = \sigma_p \left( e^{\mu \sin \alpha \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right)} - 1 \right);$
Леидер [1]	$\sigma_{\delta} = \sigma_p \left( e^{\mu \varphi \sin \alpha} - 1 \right);$
Шмидт [9]	$\sigma_{\delta} = \sigma_p \left( e^{\mu \sin \alpha (\varphi_0 - \varphi)} - 1 \right),$

где  $e$  – основание натурального логарифма;

$R$  – радиус блока или барабана;

$r$  – радиус каната;

$\alpha$  – угол свивки проволок каната;

$\mu$  – коэффициент трения между проволокой и сердечником;

$\varphi_0$  и  $\varphi$  – начальные и текущий полярные углы в сечении каната;

$\rho$  – радиус кривизны оси изгиба каната на блоке или барабане;

$l$  – длина переходного участка, на котором происходит затухание дополнительных напряжений;

$x$  – координата вдоль оси каната, отсчитываемая от точки набегания.

Все приведенные выше формулы применимы только для спиральных канатов.

Рассмотрим существующие экспериментальные методы определения напряжений. Следует отметить, что в чистом виде эти напряжения определял только И.Ф. Никитин [2, 3], который применял специальные П-образные тензорезисторы, позволившие замерять деформации диаметрально противоположных волокон проволоки и, таким образом, исключить влияние изгиба и кручения.

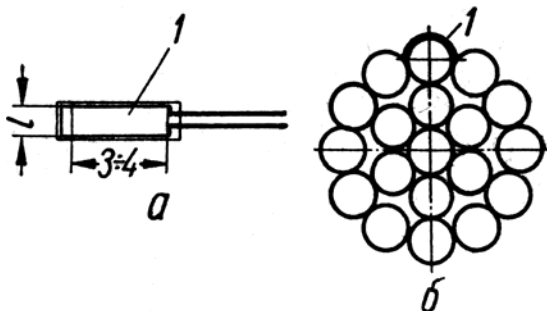


Рис. 1 – Экспериментальный канат в опытах И.Ф. Никитина:

а) П-образный тензорезистор; б) способ установки тензорезистора на канат

Для опытов был выбран спиральный канат точечного касания конструкции 1+6+12 диаметром 6 мм,  $\delta_1 = 1,2$  мм,  $\delta_2 = 1,2$  мм,  $h_1 = 46$  мм,  $h_2 = 65$  мм. На испытываемый образец каната наклеивались от четырех до семи датчиков. Навеска каната проводилась так, чтобы датчики в момент набегания каната на шкив находились со стороны выпуклости.

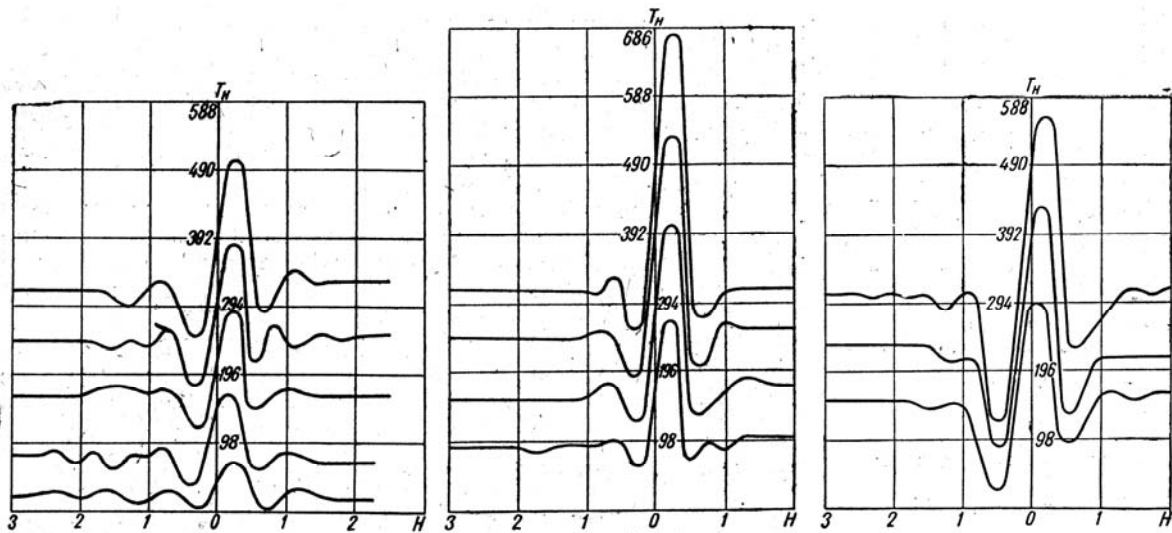


Рис. 2 – Осциллограммы дополнительных напряжений в опытах И.Ф. Никитина

Как видим из графиков, максимальные дополнительные напряжения  $\max \sigma_o$  при  $D/d = 25$  составляют  $(0,80-0,87) \sigma_p$ , а при  $D/d = 44$  и тех же нагрузках –  $(0,58-0,70) \sigma_p$ . Здесь  $\sigma_p$  – напряжение растяжения проволоки в прямой ветви каната.

Другие исследователи наклеивали тензодатчики на наружное волокно проволоки на выпуклой стороне каната и измеряли таким образом суммарные напряжения растяжения и изгиба, получая осциллограммы, типа приведенных на рис. 3.

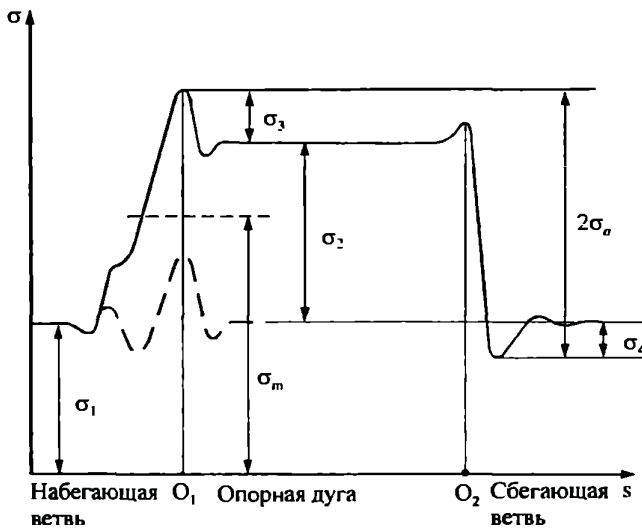


Рис. 3 – Осциллограмма нормальных напряжений в волокне каната при огибании блока

этих напряжений. Например, при обработке канатом половины числа циклов до разрушения максимальные дополнительные напряжения составляют 40-60 % от средних напряжений растяжений при  $\overline{\sigma_p} = 150 \text{ Н/мм}^2$ ; 40-50 % при  $\overline{\sigma_p} = 300 \text{ Н/мм}^2$  и 35-42 % при  $\overline{\sigma_p} = 600 \text{ Н/мм}^2$ . Автор объясняет такое увеличение  $\max \sigma_o$  увеличивающимся защемлении прядей в междупрядном контакте по мере работы каната.

Так поступали Вик [1], и Шиффнер [9]. Типовая осциллограмма для наружной проволоки каната  $6 \times 19(1+9+9)+\text{o.c.}$  диаметром 35,7 мм при соотношении  $D/d = 28,8$  из работы [10] приведена на рис. 4. В этой же работе исследовалась зависимость величины пика нормальных напряжений в точке набегания  $\sigma_3 = \max \sigma_o$  от числа отработанных циклов. Установлено, что в начале испытаний  $\max \sigma_o = (0,25 \div 0,30) \overline{\sigma_p}$ , а по мере работы каната происходит увеличение

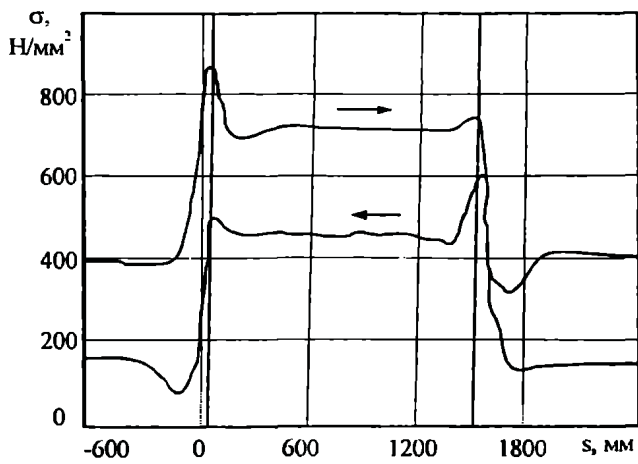


Рис. 4 – Типовая осциллограмма напряжений для каната двойной свивки из опытов Шиффнера

Три серии экспериментов по косвенному определению дополнительных напряжений выполнил Шмидт [9]. В первой серии он определял момент внутреннего конструкционного трения при набегании каната на блок и сбегании с него, для чего в опытах замерялась разность плеч жесткости. Затем по численному значению момента трения расчетным путем определялись дополнительные напряжения.

Во второй серии опытов канат подвергался волнообразному изгибу путем поперечного приложения нагрузки через систему подвижных и неподвижных роликов, при этом замерялся прогиб каната в процессе нагружения и разгрузки, и по разнице между ними также расчетным путем определялись дополнительные напряжения.

В третьей серии проводились опыты по определению усталостной прочности при знакопеременном изгибе на блоках в области малоциклового усталости, т.е. при нагрузках, близких к разрывным. Для этого на блоках испытывались отдельно проволока, прядь и канаты, которые были изготовлены из такой же проволоки, строились кривые усталостной прочности  $N(\overline{\sigma_p})$ , затем по сдвигу между кривыми определялись дополнительные напряжения в пряди и в канате по сравнению с отдельной проволокой. Как и другие авторы, Шмидт при постановке и обработке своих опытов исходил из предпосылки, что дополнительные напряжения полностью формируются силами трения скольжения между проволоками при их относительном сдвиге. Ясно, что такая постановка не учитывает целый ряд других факторов.

Оценка результатов производилась по двойной амплитуде колебаний напряжений  $2\sigma_a$  в проволоке при попадании ее на выпуклую и вогнутую стороны каната. Обобщая результаты всех опытов, Шмидт делает заключение, что величина  $2\sigma_a$  при качественной смазке при изгибе на блоках в области крановых отношений  $D/d$  составляет 40-60 % от величины среднего напряжения растяжения для канатов 6x7+о.с, 80-120 % для канатов ТК 6x19+о.с. и 120-160 % для канатов ТК 6x37+о.с. При некачественной смазке или наличии коррозии приведенные значения могут увеличиваться вдвое. Меньшие значения соответствуют канатам односторонней свивки, а большие – крестовой, что противоречит результатам других исследователей [10].

В опытах И.Ф. Никитина [2, 3] со спиральными канатами установлено, что пик смещен от точки набегания на четверть шага свивки каната в сторону изогнутого на блоке участка. В зарубежных опытах [10] с канатами двойной свивки пик напряжений соотносится с точкой набегания, хотя не указывается, как точно определялась его координата. В свете механики формирования переходного участка есть основания полагать, что и в канатах

двойной свивки пик напряжений смещен на четверть шага свивки относительно точки набегания, но в известных опытах на это, возможно, не было обращено внимание.

Сравнение значений дополнительных напряжений, полученных расчетным способом и полученных экспериментальным путем И.Ф. Никитина, приведено на рис. 5.

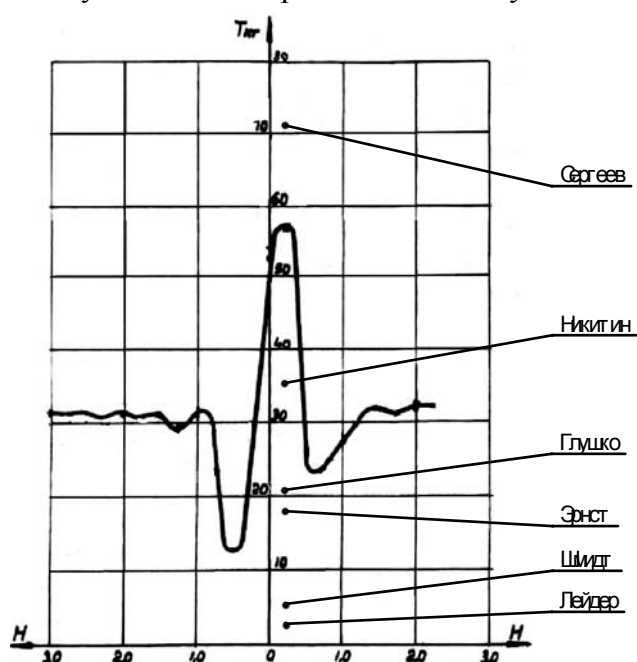


Рис. 5 – Сравнение значений дополнительных напряжений

### Выводы

Проведя сравнительный анализ методов определения дополнительных напряжений можно сделать вывод, что существующая практика определения дополнительных напряжений, которые возникают в канате при набегании его на шкив или барабан, очень далеки от результатов, полученных экспериментально. Многие авторы кроме И.Ф. Никитина и С.Т. Сергеева, даже не учитывают в расчете диаметр шкива, что увеличивает его приближенность.

### Список использованных источников:

1. Малиновский В. А. Стальные канаты: В 2 ч. – Одесса: Астропринт, 2001. – Ч. 1. – 188 с.; 2002. – Ч. 2. – 180 с.
2. Никитин И. Ф. Дополнительные усилия при переходе каната из прямого в изогнутый / И. Ф. Никитин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – К.: Техника, 1967. – Вып. 4. – С. 81–85.
3. Никитин И. Ф. Распределение напряжений в канате при пробегании его по блоку / И. Ф. Никитин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – К.: Техника, 1966. – Вып. 3. – С. 130–139.
4. Никитин И.Ф. Процесс формирования изогнутого каната при набегании его на шкив / И. Ф. Никитин, Н. Н. Фидровская // Машинобудування :зб. наук. пр. / Укр. інж. пед. акад. – Х., 2009. – Вип. 4. – С. 46–52.
5. Глушко М. Ф. К расчету вторичных изгибных напряжений в стальных канатах / М. Ф. Глушко, В. А. Малиновский. – Деп. в ЦНИИЧерметинформация // Депонированные научные работы : библиогр. указ. ВИНТИ. – 1981. – № 11.
6. Сергеев С. Т. Надёжность и долговечность подъемных канатов / С. Т. Сергеев. – К.: Техника, 1968. – 240 с.
7. Сергеев С. Т. Стальные канаты / С. Т. Сергеев. – К.: Техника, 1974. – 326 с.
8. Сергеев С. Т. Экспериментальное определение усилий в элементах набегающего на блок каната / С. Т. Сергеев, А. С. Похольченко // Стальные канаты: науч. тр. – К.: Техника, 1966. – Вып. 3. – С. 197–200.

9. Schmidt K. Die sekundäre Zugbeanspruchung der Drahtseile aus der Biegung / K. Schmidt // VDI. – 1965. – Reihe 13. – S. 181.

10. Schiffner G. Spannungen in Laufenden Drahtseilen : Dissertation / G. Schiffner ; Universität Stuttgart. – Stuttgart, 1986. – 173 s.

**Фидровская Н.Н., Ломакин А.А.** «Дополнительные напряжения в элементах стальных канатов при набегании на блоки и барабаны».

В статье рассмотрены существующие эмпирические и экспериментальные методы определения дополнительных напряжений в элементах стальных канатов при набегании на блоки и барабаны.

**Ключевые слова:** стальные канаты; проволока; барабан; блок; дополнительные напряжения; набегание; тензодатчики.

**Фідровська Н.М., Ломакін А.О.** «Додаткові напруження в елементах сталевих канатів при набіганні на блоки і барабани».

У статті розглянуто існуючі емпіричні та експериментальні методи визначення додаткових напружень в елементах сталевих канатів при набіганні на блоки і барабани.

**Ключові слова:** сталеві канати; дріт; барабан; блок; додаткові напруження; набігання; тензодатчики.

**Fidrovskaya N. M., Lomakin A. A.** “Additional stress in the elements of wire ropes in incursion of the block and the drums”.

The article considers the existing empirical and experimental methods for determining the additional stresses in elements of steel ropes in incursion of the block, and drums.

**Key words:** steel ropes; wires; drum; block; additional stress; overrunning, strain gage sensors.

Стаття надійшла до редакції 29 жовтня 2013 р.