

ISSN 0038-920X

# СТАЛЬ

1931

80 лет

2011

## С Днем металлурга!



7/2011

Москва - ООО "Интермет Инжиниринг"

УДК 62-427.42:621.316.9

## О повышении служебных свойств канатов для молниезащиты воздушных линий электропередачи

*Исследовано влияние различных факторов на служебные свойства канатов, предназначенных для молниезащиты линий электропередачи. Показано, что нанесение цинкового покрытия повышенной плотности и пластическое обжатие канатов линейного касания значительно увеличивает гарантийный срок их эксплуатации.*

**Ключевые слова:** молниезащита, линии электропередачи, канаты, грозозащитный трос, пластическое обжатие, конструктивная плотность, испытание, удар молнии, стойкость, модуль упругости, разрывное усилие, жесткость.

Применяемые в настоящее время на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) в качестве грозозащитных тросов стальные канаты по ГОСТ 3062, 3063 и 3064 являются канатами точечного касания (ТК). Помимо линий электропередачи, эти канаты применяются для устройств оттяжки мачт, судового подъема, на подвесных канатных дорогах, т. е. там, где при эксплуатации знакопеременные изгибы и пульсирующие нагрузки незначительны или полностью отсутствуют. Это связано с низкой конструктивной плотностью прядей, а также высокими контактными напряжениями внутри пряди при эксплуатации канатов ТК.

Известно, что пластическое обжатие прядей приводит к изменению геометрии поперечного сечения проволок и уплотнению пряди. В зависимости от вида касания проволок такие пряди могут быть плоскостного (ПК) и линейно-плоскостного (ЛПК) касания. Первые получают при пластическом обжатии пряди линейного касания (ЛК), вторые — точечно-линейного касания (ТЛК). Пластически обжатые пряди и канаты, изготовленные из них, обладают высокой конструктивной плотностью, повышенной разрывной и усталостной прочностью, высоким сопротивлением износу и нашли широкое применение в народном хозяйстве [1]. Цель работы — исследование возможности применения канатов типа ЛК в качестве грозозащитных тросов на воздушных линиях электропередачи с учетом предъявляемых технических требований ОАО “Федеральная сетевая компания единой энергетической системы” (ФСК ЕЭС) СТО 56947007-29.060.50.015—2008.

Разработке новой конструкции грозозащитного троса предшествовал комплекс испытаний, к которому были привлечены инженерный центр ФСК, фирма “ОРГРЭС”, ПКФ “Электросервис”, МЭИ и ряд других организаций.

На **первом этапе** работ испытанию подвергались образцы стальных канатов по ГОСТ 3063 конструкции

А. К. Власов<sup>1</sup>, В. А. Фокин<sup>1</sup>, В. В. Петрович<sup>2</sup>,  
В. И. Фролов<sup>2</sup>, В. Ф. Даненко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО “Энергосервис” (г. Москва, Россия),

<sup>2</sup> филиал “Волгоградский” ОАО “Северсталь-метиз” (г. Волгоград, Россия),

<sup>3</sup> Волгоградский государственный технический университет (г. Волгоград, Россия)

1 + 6 + 12 диам. 11 мм трех производителей: ООО “ВолгоМетиз” (ныне филиал “Волгоградский” ОАО “Северсталь-метиз”); ОАО БМК, г. Белоречк; ОАО “Силур”, г. Харцызск. Все образцы имели соответствующие заводские сертификаты на виды испытаний: 1) стойкость к удару молнии; 2) коррозионно-эрозионная стойкость; 3) оценка прочностных характеристик.

Испытания образцов стальных канатов на стойкость к удару молнии проводили на испытательном стенде “Генератор тока молнии четырехкомпонентный” (ГТМ-4) в МЭИ, соответствующим образом аттестованном и сертифицированном. Методика испытаний заключалась в оценке влияния удара молнии на подготовленные образцы канатов в 11 точках по длине образца при сохранении постоянными трех составляющих тока молнии (*A*, *B* и *D*) и изменении одной составляющей (*C*) от 55 до 110 Кл. За время испытаний каждый образец стального каната подвергали воздействию 12 – 14 ударов молнии с переносимым зарядом от 55 до 110 Кл. Для сопоставимости результатов удар молнии одинаковой мощности измеряли в трех точках по длине образца. Таким образом, моделировали реальное воздействие тока молнии на образец.

Исследование коррозионно-эрозионной стойкости образцов канатов проводили в испытательной лаборатории “ЛКП-Хотьково-Тест”. Испытанию подвергались образцы канатов двух типов: а) с цинковым покрытием, нанесенным горячим способом (ОАО “Силур”); б) с цинковым покрытием группы ОЖ, нанесенным гальваническим способом (ОАО “Северсталь-метиз”). Режимы испытаний приведены в табл. 1.

На **втором этапе** работ была испытана новая конструкция грозозащитного троса [2] по СТО 71915393 – ТУ 062–2008, предназначенного для защиты ВЛ от прямых ударов молнии. Новая конструкция троса была разработана специалистами ООО “Энергосервис”, ОАО “Северсталь-метиз”, НТЦ ОАО ФСК. Грозозащитный трос был изготовлен путем кругового

Таблица 1. Аппаратура и режимы испытаний образцов на коррозионно-эрозионную стойкость

Аппаратура	Режимы испытаний		Продолжительность выдержки образцов в цикле, ч
	температура, °С	относительная влажность, %	
Камера влаги	40 ± 2	97 ± 3	2
Камера сернистого газа SO <sub>2</sub> (концентрация 5 ± 1 мг/м <sup>3</sup> )	40 ± 2	97 ± 3	2
Камера тепла и холода	-(30 ± 3)	Не нормируется	6
Аппарат искусственной погоды, режим: 3 мин орошения; 17 мин без орошения	60 ± 3	Не нормируется	5
Камера холода	-(60 ± 3)	Не нормируется	3
Выдержка на воздухе	15 – 30	Не более 80	6
Итого			24

пластического обжатия многослойного каната с линейным касанием проволок между смежными слоями — ЛК. В качестве защитного покрытия проволок было выбрано гальваническое цинковое покрытие группы ОЖ с +5 %-ным допуском.

Оценивали стойкость троса к удару молнии путем воздействия тока с переносимым зарядом 55, 110 и 147 Кл, а также статическую прочность троса после воздействия тока. Статические испытания на растяжение образцов канатов по ГОСТ 3063 и ТУ 062 проводили на разрывной машине Quasar-600 фирмы “Галдабини” (Италия) с предельной нагрузкой 600 кН.

При создании новой конструкции троса учитывали не только его способность к молниезащите, но и возможность противостоять всему спектру эксплуатационных нагрузок. Согласно новым требованиям ОАО “ФСК ЕЭС”, были проведены дополнительные испытания грозозащитного троса на воздействие токов короткого замыкания (10-кратный нагрев до температуры 400 °С в течение одной секунды каждый), а также эоловую вибрацию (10<sup>7</sup> циклов) и галопирование (пляску) (10<sup>5</sup> циклов), как результат воздействия ветровой нагрузки.

Результаты испытаний штатных образцов каната по ГОСТ 3063 на стойкость к удару молнии показали, что они не способны противостоять воздействию мощной тепловой нагрузки, возникающей в обычной молнии. Повреждение образцов было значительным:

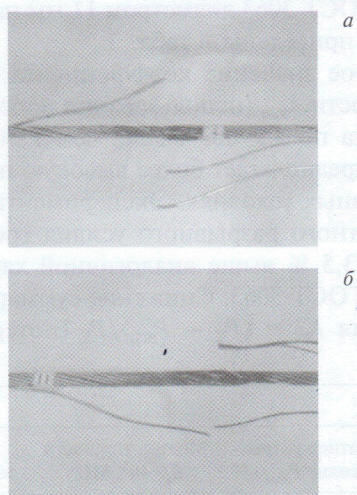


Рис. 1. Результаты испытаний на стойкость к удару молнии с переносимым зарядом: а — 70 Кл; б — 110 Кл

от 15 до 27 проволок разрушены по длине, от 15 до 52 — проплавлены по сечению. Глубокие температурные воздействия были оказаны на внутренние слои каната, иногда это сопровождалось оплавлением всего сечения. Одновременное действие назначенного числа ударов молнии на небольшой участок троса маловероятно, но вероятность суммарного воздействия в течение многих лет эксплуатации достаточно высокая.

Каждый удар определенной электрической мощности приводил к обрыву двух и более проволок в канате или к проплавлению металла проволок на большую глубину. Наблюдаемые разрушения иногда сопровождалось раскручиванием проволок и выходом их за пределы первоначального сечения за счет упругого последствия (рис. 1). Наименьшую способность к раскручиванию показали уплотненные преформацией проволочные образцы канатов ОАО “Северсталь-метиз”, но проволоки все равно не держали тепловой удар молнии, полностью разрушались или оплавливались на всю толщину металла после каждого удара.

Основные результаты сравнительных испытаний коррозионно-эрозионной стойкости двух типов образцов канатов представлены в табл. 2. Образцы с цинковым покрытием группы ОЖ, нанесенным гальваническим способом, показали абсолютную устойчивость к коррозии. Образцы с цинковым покрытием, нанесенным горячим способом, оказались сильно подвержены коррозии: площадь поражения коррозией после проведения 60 циклов достигала 28 %, что ставит под сомнение сохранение прочностных свойств каната в течение срока службы — 40 лет.

Результаты испытаний образцов канатов (ГОСТ 3063) позволяют сделать следующие выводы.

1. Полная потеря работоспособности образцов при суммарном действии разрядов в диапазоне 40 – 85 Кл.
2. Увеличение срока службы образцов при гальваническом методе оцинкования проволок.
3. Снижение агрегатного разрывного усилия всех исследованных образцов после воздействия ударов молнии.

Основная причина крайне низкой стойкости испытанных образцов стальных канатов к ударам молнии связана со следующим. Конструкция каната по ГОСТ 3063 представляет собой канат одинарной свивки с точечным касанием проволок между смежными слоями — ТК. Площадь контакта между проволоками

Таблица 2. Результаты испытаний коррозионно-эрозионной стойкости образцов стального каната ГОСТ 3063

Способ нанесения Zn-покрытия	Количество циклов	Площадь коррозионного поражения, %	Поражение, балл (ГОСТ 9.311–87)
Горячее оцинкование (ОАО “Силур”)	40	0,34	A38
	50	6,3	A34
	60	28	A32
Гальваническое оцинкование (ООО “ВолгоМетиз”)	40	Нет поражения	Нет следов коррозии
	50	То же	То же
	60	То же	То же

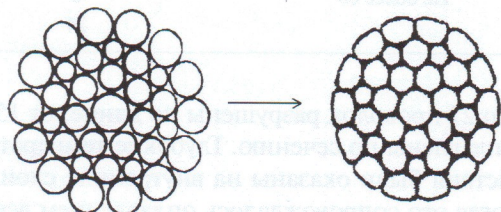


Рис. 2. Получение грозозащитного троса пластическим обжатием каната ЛК-РО

такой конструкции минимальна, степень уплотнения недостаточна для обеспечения хорошей теплопроводности. При воздействии на канат тепловой нагрузки всю ее величину воспринимают одна-две проволоки в сечении каната, а остальные в связи с большим тепловым сопротивлением между ними в процессе теплопередачи не участвуют. Под действием большой локальной тепловой нагрузки проволоки рвутся или оплавляются, а под действием свивочных и температурных напряжений еще иногда и расплетаются.

Следует также отметить, что снижение степени преформации при свивке проволок в прядь, способствующее увеличению производительности линий и снижению себестоимости канатов, негативно отражается на стойкости канатов к удару молнии (образцы канатов ОАО БМК). Снижение уплотнения пряди ведет к увеличению зазоров между проволоками и ослаблению их механической связи друг с другом в канате. Поэтому при ударе молнии раскручивание проволок происходит быстрее и на большей длине. Другим существенным недостатком канатов типа ТК является крайне низкий технический ресурс. Точки контакта проволок между слоями являются концентраторами напряжений, что ведет к повышению местных значений напряжений не только при изгибе, но и при растяжении каната. Со временем из-за действия описанного эффекта канат типа ТК может неожиданно потерять устойчивость и пластически деформироваться даже в области упругих деформаций.

Свободными от указанных недостатков являются канаты с линейным касанием проволок между смежными слоями — ЛК. В пользу выбора типа свивки ЛК

говорит много факторов, главные из которых — высокая конструктивная плотность, снижение контактных напряжений между проволоками, повышенная разрывная и усталостная прочность, высокое сопротивление износу [3, 4]. Изгибная жесткость пряди ЛК на 15 — 20 % больше жесткости пряди ТК при одинаковой суммарной площади сечения проволок [5], что говорит о большем сцеплении проволок между собой в этих прядях по сравнению с проволоками в прядях ТК.

В новой конструкции грозозащитного троса [2] в результате кругового пластического обжатия каната типа ЛК-РО конструкции 1 + 7 + 7/7 + 14 круглое поперечное сечение проволок каната становится фасонным, а линейное касание заменяется касанием по плоскости (ПК) (рис. 2). Это ведет к повышению конструктивной плотности и, как следствие, увеличению суммарной поверхности теплопередачи грозозащитного троса.

Относительное линейное обжатие при изготовлении троса составляло  $q_{л} = 4,0 - 4,5 \%$ . В пользу выбора таких степеней обжатий говорит следующее. По данным [6], зависимость продольной жесткости пряди от относительного линейного обжатия имеет экстремальный характер. Максимум значений жесткости ряда канатов соответствует диапазону обжатий 4 — 8 %. Увеличение продольной жесткости составляет 5 — 25 % по сравнению с жесткостью исходной заготовки. Следует отметить, что применение значительных пластических обжатий приводит к ухудшению некоторых механических свойств канатов в связи с большой пластической деформацией (вытяжкой) проволок. Результаты сравнительных испытаний канатов по ТУ 062 и ГОСТ 3063 диаметром 11 мм на статическую прочность приведены в табл. 3.

Расчетное значение коэффициента конструктивной плотности  $K_{к.п}$  (использования поперечного сечения) каната по ТУ 062 выше, чем каната по ГОСТ 3063, что предполагает более высокую прочность при прочих равных условиях. Экспериментальное значение агрегатного разрывного усилия грозозащитного троса на 23,5 % выше аналогичной характеристики каната по ГОСТ 3063. Снижение суммарного разрывного усилия  $K_{п} = (P_{\Sigma} - P_{ар})/P_{\Sigma}$  (потеря прочности

Таблица 3. Механические свойства канатов

Канат	Площадь сечения $A$ , мм <sup>2</sup>	Конструктивная плотность $K_{к.п}$	Агрегатное разрывное усилие $P_{ар}$ , кН	Модуль упругости $E_{к} \cdot 10^3$ , МПа	Продольная жесткость $D_{пр}$ , кН
ГОСТ 3063 конструкции 1 + 6 + 12	72,95	0,77	128,7	1,60	11672
ТУ 062 конструкции 1 + 7 + 7/7 + 14	83,59	0,88	158,9	1,85	15464

Таблица 4. Результаты испытаний образцов каната по ТУ 062 на стойкость к удару молнии

Величина заряда, Кл	Результат воздействия
55	Во время разряда электрод коснулся поверхности образцов
55	Оплавление поверхности в зоне разряда на площади $\sim 10 \times 10$ мм
110	Оплавление поверхности в зоне разряда на площади $\sim 10 \times 15$ мм
147	То же

каната от свивки) для маркировочной группы 1970 МПа составляет 0,35 и 1,76 % соответственно.

Экспериментальное значение модуля упругости каната по ТУ 062 выше, чем канатов типа ЛК-РО, прошедших предварительное вытягивание [7], и на 15,6 % выше, чем каната по ГОСТ 3063. Значительную роль в увеличении модуля упругости играет повышение плотности каната за счет пластического обжатия. Таким образом, достижение высокой плотности каната (исключение конструктивного удлинения в процессе эксплуатации) в рассмотренном случае возможно без такой силовой обработки, как предварительная вытяжка.

Для сравнительной оценки способности каната сопротивляться деформации удлинения подсчитывали продольную жесткость канатов. Значение продольной жесткости  $D_{пр} = E_k A$  каната по ТУ 062 превышает на 32,5 % значение продольной жесткости каната по ГОСТ 3063. Увеличение продольной жесткости каната приводит при эксплуатации к уменьшению деформации растяжения под нагрузкой. Испытания каната по ТУ 062 на удар молнии дали удовлетворительные результаты (табл. 4) при отсутствии снижения натяжения.

Образцы грозотроса оказались стойкими к воздействию тока молнии с переносимым зарядом 55, 110 и 147 Кл (рис. 3). При этом разрывов и смещений отдельных проволок относительно друг друга не происходило. Наблюдаемое поверхностное оплавление металла покрытия проволок не оказывало существенного влияния на статическую прочность троса. Доказательством этого послужило испытание на разрыв образца каната после воздействия на него удара молнии с переносимым зарядом 147 Кл, показавшее отсутствие какого-либо падения прочности. Вероятность того, что в реальных молниях значение заряда может быть больше 147 Кл, составляет менее 1,2 %.

Результаты испытаний канатов по ТУ 062 на воздействие всего комплекса реальных нагрузок, выдвинутых в соответствии с новыми техническими требованиями ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.50.015-2008, показали, что канат обладает следующими свойствами:

абсолютная стойкость к удару молнии с вероятностью 98,8 %;

высокая коррозионная стойкость за счет применения Zn-гальванического покрытия группы ОЖ с +5 %-ным допуском;

повышенная прочность на разрыв (1770 – 1970 МПа), что особенно важно при обледенении основных элементов воздушных ЛЭП;

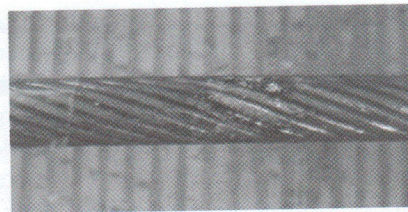


Рис. 3. Вид образцов грозозащитного троса после воздействия на него удара молнии с предельным значением заряда 147 Кл

увеличенные по сравнению со штатными канатами срок службы (почти вдвое) и гарантированный срок эксплуатации (в 5 раз);

снижение относительного удлинения каната за счет применения в процессе производства технологии уплотненной свивки, что уменьшает провисание каната при эксплуатации;

не происходит разрывов или оплавления проволок по сечению, снижения прочности после испытаний на удар молнии с величиной переносимого заряда до 147 Кл.

## Выводы

1. Показано, что увеличение степени преформации проволок при свивке и пластическое обжатие каната типа ЛК-РО повышают его конструктивную плотность и обеспечивают высокую стойкость к воздействию прямых ударов молнии, механическую прочность, снижение относительного удлинения при эксплуатационных нагрузках, а также стойкость к эоловой вибрации, галопированию и токам короткого замыкания по сравнению с традиционно используемыми для молниезащиты ЛЭП стальными канатами по ГОСТ 3062, 3063, 3064.

2. Гальванический метод нанесения цинкового покрытия группы ОЖ с +5 %-ным допуском увеличивает коррозионную стойкость каната.

3. Гарантийный срок эксплуатации грозозащитного троса с момента ввода в эксплуатацию должен составить не менее 20 лет, срок службы — не менее 40 лет под воздействием всего спектра перечисленных нагрузок.

## Библиографический список

1. Малиновский В. А., Малиновский А. В., Соломкин Л. Д. Ваерные и некоторые другие канаты типа ПК // Стальные канаты : сб. науч. тр. / Международная ассоциация исследователей стальных канатов. — Одесса, 2003. С. 243 – 250.
2. Пат. 2361304 С1 РФ, МПК Н 01 В 5/08. Грозозащитный трос / Петрович В. В., Фокин В. А., Власов А. К. и др. ; заявл. 04.06.2008 ; опубл. 10.07.2009. Бюл. № 19.
3. Гостенин В. А., Егоров В. Д. Эволюция и перспективы развития канатного производства // Сталь. 2001. № 5. С. 43 – 46.
4. Малиновский В. А., Малиновский А. В., Соломкин Л. Д. Канаты типа ПК — опыт изготовления и эксплуатации // Стальные канаты : сб. науч. тр. / Международная ассоциация исследователей стальных канатов. — Одесса, 2001. С. 225 – 230.
5. Сергеев С. Т. Стальные канаты. — Киев : Техника, 1974. — 328 с.
6. А. с. 867976 СССР. Способ изготовления проволоочного каната / D 07 В 7/02 /М. Ф. Глушко, В. А. Малиновский, Ю. В. Кобяков и др. // Открытия. Изобретения. 1981. Бюл. № 36. С. 101.
7. Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений / НИИ строит. конструкций Госстроя СССР. — М. : Стройиздат, 1978. — 94 с.