

О РАСШИРЕНИИ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИ ОБЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ ПРЯДЕЙ И ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИХ КАНАТОВ

Даненко В.Ф.¹, к.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой «Технология материалов» (omd@vstu.ru)
Гуревич Л.М.¹, д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Материаловедение и композиционные материалы»
Кушкина Е.Ю.², руководитель технологической службы
Гладских Э.Б.², менеджер

¹ Волгоградский государственный технический университет

(400005, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28)

² Филиал «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ»

(400031, Россия, Волгоград, ул. Бахтурова, 12)

Аннотация. Стальные пластически обжатые пряжи и канаты, изготовленные из них, обладая высокой конструктивной плотностью, повышенной разрывной и усталостной прочностью, высоким сопротивлением износу, нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства: речной и морской транспорт, машиностроительные и строительные предприятия, нефтегазодобывающая, металлургическая, угольная промышленность и т.п. Повышение физико-механических свойств прядей и изготовленных из них канатов за счет высокой степени заполнения металлом поперечного сечения делает возможным применение их в качестве грозозащитных тросов и высокотемпературных проводов для воздушных линий электропередачи, что подтверждается данными испытаний комплексного воздействия на них факторов, приближенных к реальным условиям. Компьютерное моделирование позволяет существенно снизить трудоемкость экспериментальных работ на промышленном оборудовании, связанных с подбором оптимальных конструктивно-геометрических и технологических параметров производства, а также осуществить прогнозирование служебных свойств пластически обжатых прядей и канатов.

Ключевые слова: проволока, пряжа, волочение, канат, пластическое обжатие, степень обжатия, конструктивная плотность, испытание, механические свойства, линии электропередачи, грозозащитный трос, оптический модуль, высокотемпературный провод, служебные свойства, компьютерное моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-764-772

Круговое (радиальное) пластическое обжатие – один из способов нейтрализации свивочных напряжений в проволоках прядей и спиральных канатов [1 – 4] осуществляется волочением в монолитных или роликовых волоках и применимо только при линейном касании (ЛК) проволоки, так как при точечном касании (ТК) проволоки будут деформироваться в местах локальных контактов вплоть до разрушения. В результате пластического обжатия круглое поперечное сечение проволоки пряди становится фасонным (трапециевидным, пяти-, шестигранным) (рис. 1), а линейное касание заменяется касанием по плоскости (ПК).

По сравнению со стандартными, пластически обжатые пряжи и свитые из них канаты обладают следующими преимуществами [2, 5 – 7]: высокая степень заполнения металлом поперечного сечения; увеличение сопротивления контактными напряжениями при обегании ими шкива, блока или барабана; повышение гибкости, усталостной прочности; повышение производительности пряжевыющего оборудования на 8 – 10 %.

Важным технологическим параметром процесса обжатия является степень обжатия прядей, более надежно характеризуемая линейным показателем $n_{\text{л}}$ [8, 9], пред-

ставляющим собой относительное уменьшение диаметра пряди. Решающее значение при назначении степени обжатия имеют условия эксплуатации каната. В работах [1, 10] предлагается следующее деление величины обжатий для канатов различного назначения:

- калибровка прядей ($n_{\text{л}} < 3 \%$), рекомендуется для канатов массового назначения в связи с повышением точности по диаметру и уменьшением контактных напряжений при работе каната;
- средние обжатия ($n_{\text{л}} = 3 - 4 \%$), обеспечивают максимальную долговечность крановых канатов;
- глубокие обжатия ($n_{\text{л}} > 8 \%$), обеспечивают работу канатов в условиях абразивного или коррозионного износа за счет высокой степени заполнения металлом поперечного сечения.

Диапазон повышенных обжатий $n_{\text{л}} = 4 - 8 \%$ в приведенной классификации не указан. Однако именно в этой области обжатий установлено [11, 12] достижение максимальной продольной жесткости прядей различной конструкции, что необходимо учитывать при проектировании канатов, применяемых в качестве ваеров, арматуры, грозозащитных тросов. Основные исследования по разработке теории обжатия прядей, про-

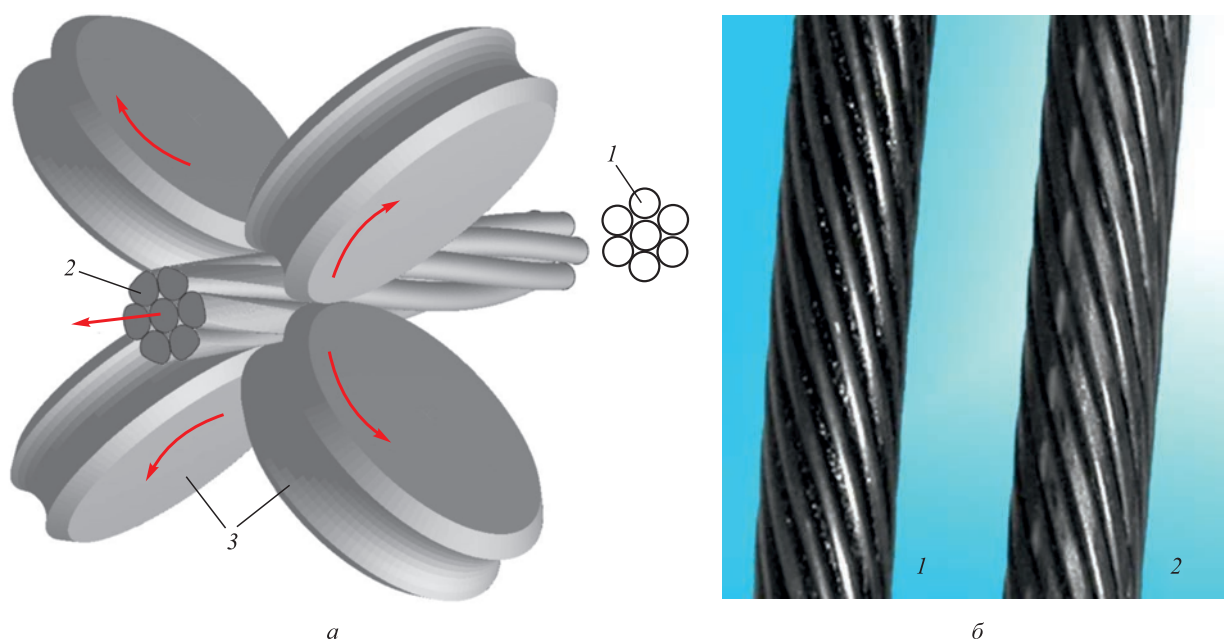


Рис. 1. Круговое пластическое обжатие пряди волочением через роликковую волоку: *a* – схема процесса обжатия; *б* – внешний вид прядей; 1 – прядь до волочения; 2 – прядь после волочения; 3 – роликковая волока

Fig. 1. The circular plastic combustion of strand at roller die:

a – scheme of the combustion process; *б* – exterior of strands; 1 – strands before drawing; 2 – strand after drawing; 3 – roller die

веденные как в России, так и за рубежом, посвящены глубокому обжатию. Следует отметить, что применение значительных пластических обжатий приводит к ухудшению некоторых механических свойств канатов в связи с большой пластической деформацией (вытяжкой) проволок.

Результаты комплексных механических испытаний проволок и прядей, изготовленных с повышенной степенью обжатия, показывают:

- некоторое снижение пластических свойств проволок наружного слоя пряди с увеличением степени обжатия, связанное с их поверхностным упрочнением. Так, при степени обжатия $n_d = 4,9\%$ снижение числа перегибов пряди конструкции $1 + 5 + 5/5 + 10$ составляет $5,2 - 11,7\%$ [10], а при увеличении обжатия до значений $n_d = 6,6 - 8,3\%$ число перегибов пряди конструкции $1 + 6 + 6/6$ снижается до $10 - 15\%$ [13] по сравнению с первоначальным;
- повышение разрывной прочности обжатых прядей на $15 - 18\%$ при степени обжатия $n_d = 4,3 - 6,3\%$ по сравнению с прядями равного диаметра и аналогичной конструкции [7, 14] за счет увеличения прочности проволок и связанную с этим повышенную стойкость к износу между составными элементами пряди, прядей в канате при работе на шкиве;
- повышение усталостной прочности от 20 до 30% при глубоком обжатию, связанное с большей контактной прочностью и поперечной жесткостью [15].

Повышение работоспособности пластически обжатых прядей и канатов из них объясняется, среди прочего, более равномерным распределением нагрузки между составными элементами пряди [14] и ограничивается величиной степени обжатия, приводящей к уменьшению площади сечения пряди за счет вытяжки металла.

В СССР исследование способов и режимов получения обжатых прядей началось с 1962 г. [5] в Одесском научно-исследовательском отделении стальных канатов (НИО «ОНИОСК»), входящем в состав ОАО «НПО Стальканат». Обжатие прядей из стальных проволок впервые было произведено в 1963 г. на Белорецком металлургическом комбинате. В дальнейшем работы были продолжены учеными Одесского политехнического института, НИО «ОНИОСК» под руководством М.Ф. Глушко и В.А. Малиновского. Технология изготовления обжатых прядей путем волочения их в процессе свивки на прядевьющих машинах была разработана и внедрена на Магнитогорском калибровочном, Одесском, Харцызском и Волгоградском сталепроволочно-канатном заводах. Изготовленные ООО «Стальканат» (Одесса) многопрядные канаты из пластически обжатых прядей показали повышение технического ресурса при работе в морских и речных портах, рыбопромысловом флоте, на мобильных кранах с большой высотой подъема, на шахтных наклонных подъемах [16]. Специалистами Магнитогорского государственного технического университета, Магнитогорского калибровочного завода и Белорецкого металлургического комбината проведены работы по освоению производства канатов

двойной свивки из пластически обжатых прядей [17], по применению пластического обжатия при производстве арматурных канатов [18] и канатов двойной свивки [19].

На Волгоградском заводе ОАО «Северсталь-метиз» (ныне филиал «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ») изготовление стальных канатов двойной свивки из пластически обжатых прядей было начато в 2006 г. Рекомендации по выбору канатов, изготовленных на этом предприятии для основных групп механизмов, представлены в табл. 1. Приведенные данные подтверждают полученные ранее результаты об увеличении работоспособности канатов из пластически обжатых прядей в среднем в 1,3 – 1,6 раза [16, 20 – 22]. Технология изготовления, механические свойства и преимущества при эксплуатации каната конструкции $6 \times 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + (7 \times 7)$ с пластически обжатыми прядями ($n_{п} = 4,2\%$) производства ОАО «Северсталь-метиз» обсуждались в работах [23, 24].

Повышение механических и служебных свойств пластически обжатых прядей и канатов из них открывает широкие перспективы для расширения их области применения. Увеличение конструктивной плотности канатов ведет к улучшению теплопроводности и электропроводности, в первую очередь за счет снижения электросопротивления локальных контактов меж-

ду отдельными проволоками пряди. Специалистами ООО «Энергосервис» (Москва), ОАО «Северсталь-метиз» (Волгоград) и НТЦ ОАО «ФСК» (Москва) были разработаны новые конструкции канатов ПК [25 – 27], которые можно использовать как грозозащитные тросы воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Изготовление опытных образцов таких канатов в филиале «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ» было начато в 2009 г. Используемые в настоящее время в качестве грозозащитных тросов стальные канаты по ГОСТ 3062, ГОСТ 3063 и ГОСТ 3064 не соответствуют техническим требованиям на грозозащитные тросы для ВЛ электропередачи (СТО 56947007-29.060.50.015-2008). Как показали сравнительные испытания, эти канаты не выдерживают воздействия мощной тепловой нагрузки, возникающей при протекании тока наиболее характерных зарядных параметров молнии, присущих большинству регионов России. В работе [28] исследована возможность применения конструкции пластически обжатого стального каната типа ЛК по СТО 71915393 – ТУ 062–2008 для защиты ВЛ от прямых ударов молнии вместо стального каната типа ТК крестовой свивки по ГОСТ 3063. Относительное линейное обжатие при изготовлении троса составляло $n_{п} = 4,0 – 4,5\%$. Стойкость канатов к удару молнии оценивали после воздействия импульсного тока с переносимым зарядом

Таблица 1

Применение канатов двойной свивки из пластически обжатых прядей

Table 1. Application of double stranding ropes of plastic crimped strands

Конструкция каната	Типы механизмов	Технический эффект	Техническая документация
$6 \times 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 6 \times 7(1 + 6) + 1 \times 7(1 + 6)$	Экскаваторы, шахтные подъемные установки	Увеличение технического ресурса в 1,5 – 1,8 раза	СТО 71915393-ТУ 090-2010
$6 \times 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 1 \text{ о.с.}$	Экскаваторы, шахтные подъемные установки	Увеличение технического ресурса в 1,5 – 1,8 раза	СТО 71915393-ТУ 040-2007
$8 \times 37(1 + 6.6 + 12 + 12) + 8 \times 7(1 + 6) + 6 \times 7(1 + 6) + 1 \times 7(1 + 6)$	Экскаваторы	Уменьшение износа и абразивного разрушения, повышенное сопротивление усилиям скручивания, сердечник всегда остается смазанным. Увеличение технического ресурса в 1,1 – 1,3 раза	СТО 71915393-ТУ 043-2007
$8 \times 36(1 + 7 + 7/7 + 7/14) + 7 \times 19(1 + 9 + 9)$	Шахтные подъемные установки	Увеличение технического ресурса в 1,5 – 2,0 раза	ТУ 14-4-496-74
$18 \times 7 + 5 \times 7/5 \times 7 + 5 \times 7 + 1 \times 7$	Краны башенные, автокраны	Некрутимость, стабильность работы механизма	СТО 71915393-ТУ 061-2008
$8 \times 26(1 + 5 + 5/5 + 10) + 6 \times 17(1 + 8 + 8) + 1 \times 17(1 + 8 + 8)$	Краны мостового типа	Стабильность работы механизма, увеличение технического ресурса в 1,5 – 2,0 раза	СТО 71915393-ТУ 051-2007
$6 \times 26(1 + 5 + 5/5 + 10) + 6 \times 7(1 + 6) + 1 \times 7(1 + 6) + 6 \times 26(1 + 5 + 5/5 + 10) + 1 \text{ о.с.}$	Буровые установки	Увеличение технического ресурса в 1,4 – 1,6 раза	СТО 71915393-ТУ 068-2008
$6 \times 26(1 + 5 + 5/5 + 10) + 3 \times 19(1 + 6 + 6/6) + 3 \text{ о.з.}$	Буровые установки	Увеличение технического ресурса в 1,3 – 1,5 раза	СТО 71915393-ТУ 049-2007

до 147 Кл. Статические испытания на растяжение исходных и после воздействия тока образцов канатов по ГОСТ 3063 и ТУ 062 проводили на разрывной машине Quasar-600 фирмы Galdabini (Италия) с предельной нагрузкой 600 кН.

Сравнительный анализ механических свойств канатов по ГОСТ 3063 и СТО 71915393-ТУ 062-2008 диаметром 11 мм приведен в табл. 2. Из данных таблицы следует, что степень заполнения металлом поперечного сечения, характеризуемая коэффициентом конструктивной плотности $K_{к.п.}$, каната по ТУ 062 выше, чем каната по ГОСТ 3063. Повышенное значение конструктивной плотности предполагает более высокую прочность при прочих равных условиях. Экспериментальное значение агрегатного разрывного усилия каната по ТУ 062 выше аналогичной характеристики каната по ГОСТ 3063. Снижение суммарного разрывного усилия $K_{п} = \frac{P_{\Sigma} - P_{арп.}}{P_{\Sigma}}$ (потеря прочности каната от свивки) для маркировочной группы 1970 МПа составляет 0,35 и 1,76 % соответственно.

Экспериментальное значение модуля упругости каната по СТО 71915393-ТУ 062-2008 выше значений модуля упругости канатов типа ЛК-РО, прошедших предварительное вытягивание [29], и каната по ГОСТ 3063 (см. табл. 2). Для сравнительной оценки способности каната сопротивляться деформации удлинения подсчитывали их продольную жесткость. Значение продольной жесткости $D_{пр} = E_K \cdot A$ каната по СТО 71915393-ТУ 062-2008 выше, чем каната по ГОСТ 3063, что приводит при эксплуатации к уменьшению деформации растяжения под

нагрузкой. Таким образом, исключение конструктивного удлинения в процессе эксплуатации в рассмотренном случае возможно без такой силовой обработки, как предварительная вытяжка (обтяжка) канатов.

Повышение конструктивной плотности обеспечивает хорошую теплопроводность, низкое электросопротивление локальных контактов и, как следствие, высокую стойкость к воздействию прямых ударов молнии. Образцы каната по СТО 71915393-ТУ 062-2008 показали абсолютную стойкость к действию тока с переносимым зарядом до 147 Кл, образцы каната по ГОСТ 3063 – полную потерю работоспособности при действии разрядов в диапазоне 40 – 85 Кл [28].

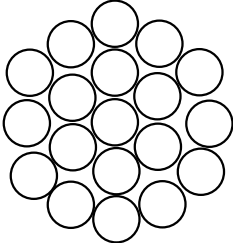
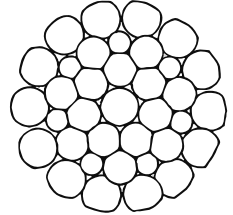
Испытания образцов на прямое воздействие тока, стойкость к воздействию эоловой вибрации, пляски, а также разрывную прочность показали [28, 30], что канаты, изготовленные по СТО 71915393-ТУ 062-2008, могут быть успешно использованы в качестве грозозащитных тросов на ВЛ электропередачи с учетом технических требований, предъявляемых ОАО «ФСК ЕЭС».

В последние годы широкое применение получил грозозащитный трос с встроенным оптоволоконном (ОКГТ) [31, 32], представляющий собой трос из стальных проволок и трубчатый корпус из алюминия или нержавеющей стали (центральный или в повиве), заполненный гидрофобным гелем и оптическими волокнами. Конструкция ОКГТ является продуктом двойного назначения: наряду с традиционной функцией защиты линии электропередачи от прямых ударов молнии, он используется как кабель связи и передачи данных, обеспечивая при этом необходимую механическую прочность. Этим

Таблица 2

Сравнительные характеристики канатов по ГОСТ 3063 и ТУ 062

Table 2. Comparative characteristics of the cables according to GOST 3063 and TU 062

Канат	Сечение	Конструктивная плотность $K_{к.п.}$	Агрегатное разрывное усилие $P_{арп.}$, кН	Модуль упругости $E_K \cdot 10^5$, МПа	Продольная жесткость $D_{пр}$, кН
ГОСТ 3063 конструкции 1 + 6 + 12		0,77 (100 %)	128,7 (100 %)	1,60 (100 %)	11 672 (100 %)
ТУ 062 конструкции 1 + 7 + 7/7 + 14		0,88 (114 %)	158,9 (123 %)	1,85 (115 %)	15 464 (132 %)

требованиям соответствует ОКГТ (ТУ 113-2013) [33], состоящий из нескольких слоев стальной проволоки, свитых вокруг центральной трубки с оптическими волокнами и гидрофобным наполнителем с пластически обжатым наружным слоем. В этом случае ОКГТ представляет собой систему, состоящую из элементов с сильно различающимися механическими характеристиками, что предполагает использование новых методов расчета необходимых геометрических параметров (количества и диаметра проволок в каждом слое) и прогнозирования локализации деформации в ее элементах.

В работе [34] установлено, что при круговом обжатии пряди конструкции 1 + 5 + 5/5 + 10 первоначально в центральном слое реализуется до 50 % прилагаемого извне усилия, что ведет к формированию локальных концентраторов давления. При образовании боковых (арочных) контактов в слоях давление на центральную проволоку уменьшается в 8,8 раза. В связи с этим, неудачный выбор геометрических или технологических параметров при производстве ОКГТ может привести к значительной деформации оптического модуля и, в результате, к недопустимому увеличению коэффициента затухания оптического волокна. Существенно снизить трудоемкость экспериментальных работ на промышленном оборудовании, связанных с подбором оптимальных диаметров элементов ОКГТ и параметров деформирования, позволяет компьютерное моделирование. Например, на рис. 2 показано распределение пластических деформаций в элементах ОКГТ диаметром 11,3 мм конструкции 1 + 9 + 9 для двух вариантов размеров проволок, полученное при проведенном авторами моделировании с использованием пакета SIMULIA/Abaqus кругового обжатия ОКГТ в конической монолитной волоке. При моделировании вместо оптического модуля использовали однородный сердеч-

ник, механические свойства которого соответствовали алюминию. Диаметры элементов ОКГТ для первого и второго вариантов принимались: сердечника 3,2 и 3,0 мм, проволоки первого слоя 1,6 и 1,6 мм, проволоки второго слоя 2,8 и 3,0 мм соответственно.

При первом варианте, даже при степени кругового обжатия $n_{\text{д}} = 6,2\%$, проволоки второго (наружного) слоя не касаются друг друга, при этом профиль сердечника в поперечном сечении сильно искажен (рис. 2, а). Формирование арочных контактов у проволок первого слоя начиналось только после обжатия $n_{\text{д}} = 3,3\%$, в этот момент пластическая деформация на поверхности сердечника в отдельных участках достигала 34 %.

При втором варианте в процессе обжатия первоначально возникали боковые контакты между проволоками второго слоя, затем при степени обжатия $n_{\text{д}} = 0,9\%$ начинали формироваться пластически деформированные площадки боковых контактов в первом слое. Деформация сердечника начиналась после уменьшения диаметра ОКГТ на 0,07 мм с момента образования боковых контактов в первом слое. Пластическая деформация на поверхности сердечника при степени обжатия $n_{\text{д}} = 4,5\%$ составляла ~14 – 15 % (рис. 2, б).

Компьютерное моделирование может быть использовано не только для оптимизации конструкции пластически обжатых проводов и технологических параметров их получения, но и для определения характеристик процессов, происходящих при их эксплуатации. Подтверждением сказанному служит выполненное моделирование температуры и плотности тока в ОКГТ при прохождении тока короткого замыкания [35] и эксплуатационных свойств при различных климатических условиях [36, 37].

На увеличение токовой пропускной способности существующих ВЛ и повышение их надежности направлена одна из последних разработок российских

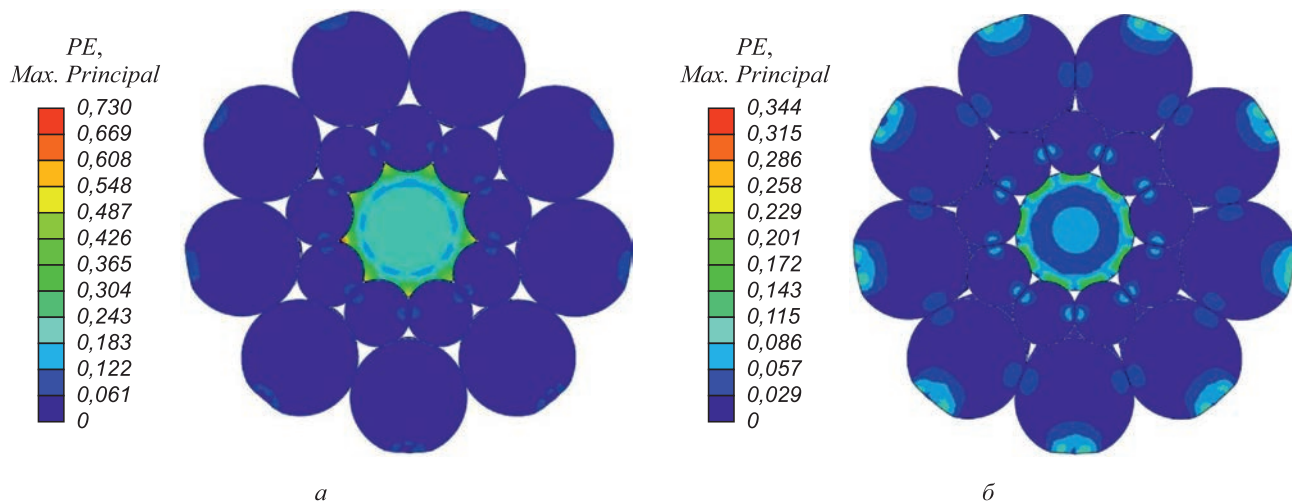


Рис. 2. Распределение пластических деформаций в элементах ОКГТ диаметром 11,3 мм конструкции 1 + 9 + 9 при круговом обжатии: а – первый вариант ($n_{\text{д}} = 6,2\%$); б – второй вариант ($n_{\text{д}} = 4,5\%$)

Fig. 2. Plastic deformation distribution in the OPGW with 11.3 mm diameter strands (1 + 9 + 9) at circular combustion: а – the first variant ($n_{\text{д}} = 6.2\%$); б – the second variant ($n_{\text{д}} = 4.5\%$)

производителей ООО «Энергосервис» и ОАО «Северсталь-метиз»: пластически обжатые сталеалюминевые (АС) провода [26, 38, 39]. Сравнительные характеристики классических по ГОСТ 389 и пластически обжатых по СТО 71915393-ТУ 120-2012 АС проводов приведены в табл. 3 [38].

Повышение конструктивной плотности АС проводов за счет последовательного пластического обжатия стального сердечника ($n_{\text{д}} = 3,6 - 4,4 \%$) и токоведущих повивов из алюминиевых проволок ($n_{\text{д}} = 4,1 - 4,6 \%$) [26, 39] ведет к формированию электрических контактов высокой проводимости между проволоками, что позволяет снизить электромагнитные потери на тепловыделение в сердечнике [40]. Кроме того, проведение пластического обжатия позволяет «сгладить» наружный контур провода, приблизить его к цилиндрическому, а, следовательно, уменьшить его аэродинамическое сопротивление. Сравнительное моделирование поведения проводов с использованием пакета COMSOL Multiphysics показало, что для проводов с близкими площадями поперечного сечения ветровая нагрузка на провода АС без ледяного покрова примерно на 40 % выше, чем на пластически обжатые провода АС [41].

По результатам испытаний проводов различных конструкций в климатической установке Донбасской национальной академии строительства и архитектуры [42 – 44] при всех равных условиях интенсивность образования гололедно-изморозевых отложений на компактных проводах (к которым можно отнести и пластически обжатые АС провода) ниже на 12 % для

моделируемых условий эксперимента, соответствующих району II по стенке гололеда [45].

Перспективы и преимущества применения пластически обжатых канатов различных конструкций для ВЛ электропередачи для регионов с повышенными значениями ветровых, грозовых и гололедных воздействий приведены в работе [46].

Выводы. Проведенный литературный обзор показывает, что работоспособность пластически обжатых прядей и канатов из них в среднем в 1,3 – 1,6 раза выше по сравнению со стандартными круглопроволочными прядями и канатами, что позволяет успешно применять их в различных отраслях народного хозяйства. Увеличение конструктивной плотности и продольной жесткости канатов различных конструкций при повышенных обжатиях $n_{\text{д}} = 4 - 8 \%$ делает возможным их использование в качестве грозозащитных тросов и высокотемпературных проводов. Также это дает возможность эффективно решать вопросы молниезащиты и повышения токовой пропускной способности ВЛ электропередачи при воздействии всего спектра эксплуатационных нагрузок. Существенно снизить трудоемкость работ при проектировании и производстве различных конструкций пластически обжатых канатов для ВЛ электропередачи позволяет компьютерное моделирование.

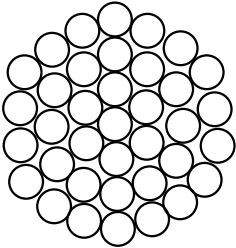
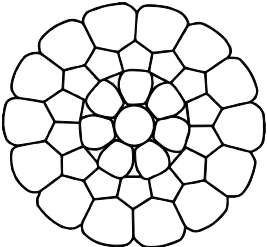
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малиновский В.А. Стальные канаты. Ч. 1. Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования. – Одесса: АстроПринт, 2001. – 188 с.

Таблица 3

Сравнительные характеристики АС проводов по ГОСТ 389 и ТУ 120

Table 3. Comparative characteristics of the speaker wires according to GOST 389 and TU 120

Провод	Сечение	Сопротивление, Ом/км	Расчетное разрывное усилие, кН	Масса, кг/км	Ток, А
ГОСТ 389 конструкции 1×37(1 + 6) + (12 + 18)		0,197 (100 %)	98,253 (100 %)	1106 (100 %)	610 (100 %)
ТУ 120 конструкции 1×36К(1 + 7) + К(14 + 14)		0,104 (87 %)	163,94 (167 %)	1399,6 (127 %)	1199,6 (197 %)

Примечание. Буква «К» обозначает процесс пластического обжатия.

2. Мольнар В.Г., Владимиров Ю.В. Технологические основы производства стальных канатов. – М.: Металлургия, 1975. – 200 с.
3. Сергеев С.Т. Стальные канаты. – Киев: Техника, 1974. – 328 с.
4. Мамаев Ю.Д., Даненко В.Ф. Производство и эксплуатация стальных канатов. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – 212 с.
5. Скалацкий В.К. Канаты из обжатых прядей: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 1. – Киев: Техника, 1964. С. 152 – 158.
6. Скалацкий В.К., Шкарупин Б.Е. Исследование механических свойств обжатых прядей и канатов из них: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 4. – Киев: Техника, 1967. С. 138 – 145.
7. Глушко М.Ф., Скалацкий В.К., Шилин И.А. Эволюция и перспективы развития технологии производства стальных канатов: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 5. – Киев: Техника, 1968. С. 94 – 101.
8. Скалацкий В.К. Оценка степени деформации при пластическом обжатии круглых прядей: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 6. – Киев: Техника, 1969. С. 170 – 173.
9. Скалацкий В.К., Соломкин Л.Д. Методы определения степени пластического обжатия прядей: Сб. тр. «Повышение эффективности и качества метизных изделий». – М.: Металлургия, 1981. С. 50 – 54.
10. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Выбор режимов деформации при обжатии многослойных канатов в трехроликовых волоках // Производство проката. 2013. № 8. С. 18 – 25.
11. А. с. 867976 СССР. Способ изготовления проволочного каната / М.Ф. Глушко, В.А. Малиновский и др.; опубл. 30.09.81. Бюл. № 36.
12. Малиновский В.А., Кобяков Ю.В. Продольная жесткость обжатых прядей: Сб. тр. «Повышение эффективности и качества метизных изделий». – М.: Металлургия, 1981. С. 41 – 43.
13. Скалацкий В.К., Емельянов В.Г. Повышение технического ресурса канатов из пластически обжатых прядей: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 9. – Киев: Техника, 1972. С. 171 – 179.
14. Скалацкий В.К., Кулик Н.Т. Характер распределения напряжений в круглых пластически обжатых прядях при осевом растяжении: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 6. – Киев: Техника, 1969. С. 154 – 157.
15. Глушко М.Ф., Скалацкий В.К. Вопросы расчета, механические испытания и сравнительная оценка круглых обжатых прядей: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 2. – Киев: Техника, 1965. С. 172 – 180.
16. Малиновский В.А., Соломкин Л.Д. Ваерные и некоторые другие канаты типа ПК: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 3. – Одесса: АстроПринт, 2003. С. 243 – 250.
17. Лаптева Т.А. Повышение работоспособности подвижных канатов на основе применения калибрующего обжатия прядей: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – 18 с.
18. Стравничук П.А. Разработка энергосберегающей технологии производства пластически деформированных арматурных канатов прокаткой: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 16 с.
19. Калибрующее обжатие канатов двойной свивки в роликковой волоке: Межвуз. сб. науч. тр. «Обработка сплошных и слоистых материалов». Вып. № 1 (42) / В.А. Харитонов, В.Е. Лунев, М.А. Полякова и др. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2015. С. 22 – 28.
20. Вагелюк В.И., Скалацкий В.К. Опыт эксплуатации канатов из круглых обжатых прядей: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 6. – Киев: Техника, 1969. С. 210 – 212.
21. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Влияние малых степеней обжатия на формирование напряженного состояния каната: Межвуз. сб. науч. тр. «Обработка сплошных и слоистых материалов». Вып. № 1. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 172 – 174.
22. Скалацкий В.К., Емельянов В.Г. Работоспособность канатов из пластически обработанных прядей в зависимости от материала и параметров формирования прядей: Сб. тр. «Стальные канаты». Вып. 10. – Киев: Техника, 1973. С. 110 – 120.
23. Трусов В.А., Капуткина Л.М. и др. Исследование и разработка технологии изготовления нового вида продукции – стальных канатов с пластически обжатыми прядями в ОАО «Северсталь – метиз» // Производство проката. 2011. № 10. С. 33 – 37.
24. Трусов В.А., Капуткина Л.М. и др. Влияние пластического деформирования при волочении проволочных прядей в роликковой клетки на механические свойства стальных канатов // Производство проката. 2012. № 1. С. 41 – 44.
25. Пат. 2361304 РФ. Грозозащитный трос / В.В. Петрович, В.А. Фокин, А.К. Власов и др.; опубл. 10.07.2009. Бюл. № 19.
26. Пат. 132241 РФ. Сталеалюминевый провод для воздушной линии электропередачи / В.А. Фокин, А.К. Власов, В.В. Петрович и др.; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.
27. Пат. 2490742 РФ. Способ изготовления стального троса / В.А. Фокин, А.К. Власов, В.И. Фролов; опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23.
28. Власов А.К., Фокин В.А., Петрович В.В. и др. О повышении служебных свойств канатов для молниезащиты воздушных линий электропередачи // Сталь. 2011. № 7. С. 78 – 81.
29. Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений / НИИ строит. конструкций Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1978. – 94 с.
30. Власов А.К., Фокин В.А., Даненко В.Ф. и др. Исследование стойкости грозозащитных тросов к ударам молнии и механическим воздействиям // Сталь. 2013. № 9. С. 66 – 70.
31. Боксимер М.Э. Преимущества оптического кабеля ОКГТ // Электротехнический рынок. 2007. № 7 – 8. С. 11 – 13.
32. Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В., Бабков Е. Грозозащитный трос с оптическим волокном. Термическая стойкость к прямому удару молнии // Новости электротехники. 2011. № 4. <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/07.php>.
33. Пат. 2441293 РФ. Грозозащитный трос с оптическим кабелем связи / А.К. Власов, В.А. Фокин, В.В. Петрович, В.И. Фролов; опубл. 27.01.2012. Бюл. № 3.
34. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Расчет распределения деформаций по сечению пряди при круговом обжатии // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 47 – 51.
35. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В., Трунов М.Д. Моделирование температуры и плотности тока в грозозащитном тросе при прохождении тока короткого замыкания // Энергия единой сети. 2014. № 5. С. 16 – 23.
36. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В. и др. Моделирование эксплуатационных свойств грозозащитного троса с оптическим кабелем связи // Энергия единой сети. 2014. № 1. С. 38 – 45.
37. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В. и др. Моделирование эксплуатационных свойств грозозащитного троса с оптическим кабелем связи при различных климатических условиях // Воздушные линии. 2015. № 1. С. 25 – 33.
38. Колосов С.В., Фокин В.А. Новое поколение проводов ВЛ: пластически деформированные провода // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 1. С. 84 – 86.
39. Пат. 2447525 РФ. Способ изготовления высокотемпературного провода для воздушной линии электропередачи и провод, полученный данным способом / В.А. Фокин, А.К. Власов, В.В. Петрович и др.; опубл. 10.04.2012. Бюл. № 10.
40. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В. и др. Моделирование электромагнитных потерь в сталеалюминевых проводах различной конструкции // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 5 (26). С. 68 – 71.
41. Исследование аэродинамической устойчивости и гололедообразования проводов АСВП и АСВТ. http://www.energoserwise.com/files/Ussledovanie_aerodina_ystoichivosti.pdf
42. Назим Я.В., Лещенко А.А. Лабораторные исследования гололедообразования на сталеалюминевых проводах воздушных линий электропередачи в климатической камере ДонНАСА: Збір-

- ник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництво). Вип. 2 (30). 2011. ПолтНТУ. С. 122 – 128.
43. Горохов Е.В., Назим Я.В., Васылев В.Н. и др. Испытания на гололедофобность компактных и секторных проводов воздушных линий электропередачи в климатической камере // *Металлические конструкции*. Т. 18. № 1. 2012. С. 73 – 84.
44. Правила устройства электроустановок. Глава 2.5 «Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ до 750 кВ». – Киев: ГРИФЭ: Министерство топлива и энергетики Украины, 2006. – 125 с.
45. Правила устройства электроустановок. Изд. 7. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 176 с.
46. Власов А.К. Преимущества использования пластически обжатых сталеалюминовых высокопрочных (АСВП), высокотемпературных (АСВТ) проводов, грозозащитных тросов (ТУ 062-2008) и ОКГТ (ТУ 113-2013) при реконструкции и новом строительстве ВЛ // *Воздушные линии*. 2014. № 4. С. 23 – 29.

Поступила 3 сентября 2015 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 11, pp. 764–772.

EXTENSION OF THE SCOPE OF STEEL COMPACTED STRANDS AND ROPES MADE OF THEM

V.F. Danenko¹, L.M. Gurevich¹, E.Yu. Kushkina², E.B. Gladshikh²

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

²JSC “Severstal”, Redaelli SSM, Volgograd branch, Volgograd, Russia

Abstract. Steel compacted strands and ropes made of them, having high constructive density, high wear resistance, increased tensile and fatigue strength, are widely used in various sectors of the economy: river and sea transport, engineering and construction pre-acceptance, oil and gas, metallurgy, coal industry, etc. The increase of physical and mechanical properties of the strands and the ropes made of them by high degree of filling with metal of cross-section makes it possible to use them as a ground wire and high-temperature cables for overhead electric power lines, which can be confirmed by testing with integrated action on them of factors close to real conditions. Computer modeling can significantly reduce the complexity of the experimental work on the industrial-rated equipment related to the selection of the optimal constructive-geometrical and technological parameters of production, as well as to carry out forecasting service properties of plastically pressed ropes and strands.

Keywords: wire, strand, drawing, rope, compacted, compression degree, structural density, mechanical properties, power lines, thunderstorms, security cable, optical module, high-temperature wire, service properties, computer simulation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-764-772

REFERENCES

1. Malinovskii V.A. *Stal'nye kanaty. Chast' I. Nekotorye voprosy tekhnologii, rascheta i proektirovaniya* [Steel ropes. Part 1: Some questions of technology, calculation and design]. Odessa: AstroPrint, 2001, 188 p. (In Russ.).
2. Mol'nar V.G., Vladimirov Yu.V. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva stal'nykh kanatov* [Technological basis of the production of steel ropes]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 200 p. (In Russ.).
3. Sergeev S.T. *Stal'nye kanaty* [Steel ropes]. Kiev: Tekhnika, 1974, 328 p. (In Russ.).
4. Mamaev Yu.D., Danenko V.F. *Proizvodstvo i ekspluatatsiya stal'nykh kanatov* [Production and operation of steel ropes]. Volgograd: IUNL VolgGTU, 2010, 212 p. (In Russ.).
5. Skalatskii V.K. Ropes made of crimped strands. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 1. Kiev: Tekhnika, 1964, pp. 152–158. (In Russ.).
6. Skalatskii V.K., Shkarupin B.E. The study of mechanical properties of crimped strands and ropes made of them. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 4. Kiev: Tekhnika, 1967, pp. 138–145. (In Russ.).
7. Glushko M.F., Skalatskii V.K., Shilin I.A. Evolution and prospects of the production technology development of steel ropes. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 5. Kiev: Tekhnika, 1968, pp. 94–101. (In Russ.).
8. Skalatskii V.K. Assessment of the deformation degree at the plastic compression of round strands. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 6. Kiev: Tekhnika, 1969, pp. 170–173. (In Russ.).
9. Skalatskii V.K., Solomkin L.D. Methods for determining the degree of plastic compression of strands. In: *Sb. tr. Povyshenie effektivnosti i kachestva metiznykh izdelii* [Coll. of papers: Improving the efficiency and quality of metal wares]. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 50–54. (In Russ.).
10. Kharitonov V.A., Lapteva T.A. Choice of deformation modes at compression of the multilayer ropes at three-roller die. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 8, pp. 18–25. (In Russ.).
11. Glushko M.F., Malinovskii V.A., Kobayakov Yu.V., Skalatskii V.K., Emel'yanov V.G. *Sposob izgotovleniya provolochnogo kanata* [A method of wire rope manufacturing]. Certificate of authorship USSR no. 867976. *Byulleten' izobretenii*. 1981, no. 36. (In Russ.).
12. Malinovskii V.A., Kobayakov Yu.V. Longitudinal stiffness of the crimped strands. In: *Sb. tr. Povyshenie effektivnosti i kachestva metiznykh izdelii* [Coll. of papers: Improving the efficiency and quality of metal wares]. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 41–43. (In Russ.).
13. Skalatskii V.K., Emel'yanov V.G. Increase of service life of ropes of plastic crimped strands. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 9. Kiev: Tekhnika, 1972, pp. 171–179. (In Russ.).
14. Skalatskii V.K., Kulik N.T. Nature of the distribution of stresses in round plastic crimped strands under axial tension. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 6. Kiev: Tekhnika, 1969, pp. 154–157. (In Russ.).
15. Glushko M.F., Skalatskii V.K. Questions of calculation, mechanical testing and comparative assessment of the round crimped strands. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 2. Kiev: Tekhnika, 1965, pp. 172–180. (In Russ.).
16. Malinovskii V.A., Solomkin L.D. Waern and some other ropes of PK type. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 3. Odessa: AstroPrint, 2003, pp. 243–250. (In Russ.).
17. Lapteva T.A. *Povyshenie rabotosposobnosti podvizhnykh kanatov na osnovu primeneniya kalibrnyushchego obzhatiya pryadei: Avtoref. ... dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing efficiency of mobile rope through the use of caliber compression of strands: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Magnitogorsk: MGTU, 2014, 18 p. (In Russ.).
18. Stravnichuk P.A. *Razrabotka energosberegayushchei tekhnologii proizvodstva plasticheski deformirovannykh armaturnykh kanatov prokatko: Avtoref. ... dis. kand. tekhn. nauk* [Development of the energy-saving technology of production of plastically deformed reinforcing ropes by rolling: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Magnitogorsk: MGTU. 2003, 16 p. (In Russ.).
19. Kharitonov V.A., Lunev V.E., Polyakova M.A. etc. Caliber compression of ropes of double lay in a roller die. In: *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Treatment of solid

- and laminated materials: Coll. of scientific papers]. Issue 1 (42). Magnitogorsk: MGТУ, 2015, pp. 22–28. (In Russ.).
20. Vagelyuk V.I., Skalatskii V.K. Operation experience of ropes of round crimped strands. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 6. Kiev: Tekhnika, 1969, pp. 210–212. (In Russ.).
 21. Kharitonov V.A., Lapteva T.A. Influence of small reduction ratio on the formation of stress state of the rope. In: *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Treatment of solid and laminated materials: Coll. of scientific papers]. Issue 1. Magnitogorsk: MGТУ, 2010, pp. 172–174. (In Russ.).
 22. Skalatskii V.K., Emel'yanov V.G. Operability of the ropes of plastically treated strands depending on the material and formation parameters of strands. In: *Sb. tr. Stal'nye kanaty* [Coll. of papers: Steel ropes]. Issue 10. Kiev: Tekhnika, 1973, pp. 110–120. (In Russ.).
 23. Trusov V.A., Kaputkina L.M. etc. Research and development of the production technology of a new product – steel ropes with plastically crimped strands in OJSC “Severstal-metiz”. *Proizvodstvo prokata*. 2011, no. 10, pp. 33–37. (In Russ.).
 24. Trusov V.A., Kaputkina L.M. etc. Influence of plastic deformation during drawing of wire strands in the roller cage on the mechanical properties of steel ropes. *Proizvodstvo prokata*. 2012, no. 1, pp. 41–44. (In Russ.).
 25. Petrovich V.V., Fokin V.A., Vlasov A.K., Frolov V.I., Zvyagintsev A.V., Zhulev A.N. *Grozozashchitnyi tros* [Ground wire]. Patent RF no. 2361304. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 19. (In Russ.).
 26. Fokin V.A., Vlasov A.K., Petrovich V.V., Zvyagintsev A.V., Frolov V.I. *Staleal'yuminevyi provod dlya vozdushnoi linii elektroperedachi* [Steel-aluminum wire for overhead power transmission line]. Patent RF no. 132241. Publ.: 10.09.2013. *Byul.* no. 25. (In Russ.).
 27. Fokin V.A., Vlasov A.K., Frolov V.I. *Sposob izgotovleniya stal'nogo trosa* [A production method of steel cable]. Patent RF no. 2490742. *Byulleten' izobretenii*. 2013, no. 23. (In Russ.).
 28. Vlasov A.K., Fokin V.A., Petrovich V.V., Frolov V.I., Danenko V.F. Improving the performance of lightning-protection cables for overhead power lines. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 7, pp. 607–610.
 29. *Rukovodstvo po primeneniyu stal'nykh kanatov i ankernykh ustroystv v konstruktivnykh zdaniy i sooruzheniy. NII stroit. konstrukt-sii Gosstroya SSSR* [Guidance on the application of steel ropes and anchoring devices in buildings and structures. SRI building designs USSR State Committee]. Moscow: Stroiizdat, 1978. 94 p. (In Russ.).
 30. Vlasov A.K., Fokin V.A., Danenko V.F. etc. The study of resistance of ground wire to the lightning and mechanical stress. *Stal'*. 2013, no. 9, pp. 66–70. (In Russ.).
 31. Boksimer M.E. Advantages of Optical Cable OPGW. *Elektrotekhnicheskii rynek*. 2007, no. 7–8, pp. 11–13. (In Russ.).
 32. Dubitskii S.D., Korovkin N.V., Babkov E. Ground wire with optical fiber. Thermal resistance to direct lightning strike. *Novosti elektrotekhniki*. 2011, no. 4. Available at URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/07.php>. (In Russ.).
 33. Vlasov A.K., Fokin V.A., Petrovich V.V., Frolov V.I. *Grozozashchitnyi tros s opticheskim kabelem svyazi* [Ground wire with optical cable connection]. Patent RF no. 2441293. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 3. (In Russ.).
 34. Kharitonov V.A., Lapteva T.A. Calculation of the strain distribution over the section of the strand in the circumferential compression. *Vestnik MGТУ im. G.I. Nosova*. 2012, no. 4, pp. 47–51. (In Russ.).
 35. Gurevich L.M., Danenko V.F., Pronichev D.V., Trunov M.D. Simulation of temperature and current density in the ground wire in the passage of short circuit. *Energiya edinoi seti*. 2014, no. 5, pp. 16–23. (In Russ.).
 36. Gurevich L.M., Danenko V.F., Pronichev D.V. etc. Simulation of the operational properties of ground wire with optical connection cable. *Energiya edinoi seti*. 2014, no. 1, pp. 38–45. (In Russ.).
 37. Gurevich L.M., Danenko V.F., Pronichev D.V. etc. Simulation of the operational properties of ground wire with optical connection cable under different climatic conditions. *Vozdushnye linii*. 2015, no. 1, pp. 25–33. (In Russ.).
 38. Kolosov S.V., Fokin V.A. New generation of overhead wires: plastically deformed wire. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2014, no. 1, pp. 84–86. (In Russ.).
 39. Fokin V.A., Vlasov A.K., Petrovich V.V., Zvyagintsev A.V., Frolov V.I. *Sposob izgotovleniya vysokotemperaturnogo provoda dlya vozdushnoi linii elektroperedachi i provod, poluchennyi dannym sposobom* [The method of manufacturing the high temperature wires for aerial power lines and wire obtained in this manner]. Patent RF no. 2447525. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 10. (In Russ.).
 40. Gurevich L.M., Danenko V.F., Pronichev D.V. etc. Simulation of electromagnetic losses in the steel-aluminum wires of different constructions. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2014, no. 5 (26), pp. 68–71. (In Russ.).
 41. *Issledovanie aerodinamicheskoi ustoychivosti i gololedoobrazovaniya provodov ASVP I ASVT* [Research of aerodynamic stability and ice formation of ASVP and ASVT wires]. Available at URL: http://www.energyservice.com/files/Ussledovanie_aerodina._ystoichivosti.pdf (In Russ.).
 42. Nazim Ya.V., Leshchenko A.A. Laboratory studies of ice formation on the steel-aluminum wires of overhead power lines in the DonNASA climatic chamber. *Zbirnik naukovikh prats' (galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo)*. Issue 2 (30). 2011. PolNTU, pp. 122–128. (In Russ.).
 43. Gorokhov E.V., Nazim Ya.V., Vasylev V.N. etc. Tests on ice resistance of the compact and sector wires of overhead power lines in the climatic chamber. *Metallicheskie konstruktii*. vol. 18, no. 1. 2012, pp. 73–84. (In Russ.).
 44. *Rules for electrical installations*. Part 2.5 “The overhead power transmission lines with voltages above 1kV to 750 kV”. Kiev: OEP “GRIFRE”, 2006, 125 p.
 45. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Rules for electrical installations]. 7th Edition. Moscow: Izd-vo NTs ENAS. 2003, 176 p. (In Russ.).
 46. Vlasov A.K. Benefits of using crimped steel-aluminum, high-strength plastic (ASVP), high-temperature (ASVT) wire, ground (TU 062-2008) and OPGW (TU 113-2013) wires in reconstruction and new construction of the overhead power lines. *Vozdushnye linii*. 2014, no. 4, pp. 23–29. (In Russ.).

Information about the authors:

V.F. Danenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Deputy Head of the Chair “Materials Technology” (omd@vstu.ru)

L.M. Gurevich, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Material Science and Composite Materials”

E.Yu. Kushkina, Head of Technology Services

E.B. Gladskikh, Manager

Received September 3, 2015