

DOI:

## Оценка перспективных разработок алюминиевых сплавов для применения в проводах нового поколения

- **Шакиров Р. Г.<sup>1</sup>**, ООО “Башкирэнерго”, Республика Башкортостан, Уфа
- **Саттаров Р. Р.**, доктор техн. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет, Республика Башкортостан, Уфа
- **Гундеров Д. В.**, доктор физ.–мат. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет; Институт физики молекул и кристаллов ФГБНУ УФИЦ РАН, Республика Башкортостан, Уфа,
- **Мурашкин М. Ю.**, канд. техн. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет, Республика Башкортостан, Уфа; Санкт–Петербургский государственный университет, Санкт–Петербург

В электрических сетях российских энергокомпаний идёт постепенная замена проводов марки АС на провода нового поколения (ПНП). На рынке проводниковой продукции в настоящее время предлагается широкий спектр ПНП как зарубежного, так и российского производства. Провода зарубежного производства предлагаются на качественно новом уровне с повышенными эксплуатационными свойствами, но с высокой стоимостью, также как и провода, выпускаемые в РФ по западным технологиям. Выпуск ПНП российского производства сейчас на пути становления и уже есть продукция, приближенная к мировым стандартам. В настоящей статье авторами представлены алюминиевые сплавы, прошедшие интенсивную пластическую деформацию и отжиг, с качественно новыми электрическими и механическими характеристиками – в перспективе материал для ПНП. Рассмотрены вопросы расчёта и конструирования провода из полученных сплавов и определения допустимых токов и других характеристик смоделированных проводов.

**Ключевые слова:** провод нового поколения (ПНП), интенсивная пластическая деформация (ИПД), ИПД-обработка, отжиг, допустимый ток, провода из алюминиевых сплавов, смоделированный провод.

Для эффективного решения проблем пропускания электроэнергии по проводам воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 35 кВ и выше в энергосистемах страны рассматриваются свойства проводов нового поколения (ПНП), подбираются провода с качественно новыми характеристиками, которые существенно превосходят по своим эксплуатационным свойствам классические сталеалюминиевые провода типа АС. Ранее в литературе [1 – 3] довольно подробно описывались преимущества уже существующих проводов нового поколения. Эти провода выполнены на основе алюминиевых сплавов и в основном зарубежного производства, что сказывается на их цене, которая выше цен проводов АС в 4 – 6 раз [2].

В России подавляющее большинство воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше пока ещё работают с проводами АС. Идёт замена этих проводов на современные, однако из-за высокой стоимости ПНП процесс реконструкции ВЛЭП замедлен. Требуется провода с улучшенными характеристиками и по стоимости, сравнимые с проводами АС. Создание качественной продукции в стране требуется также в плане

импортозамещения [4]. В России уже налажен выпуск ПНП, отвечающих всем современным требованиям [5], например, на заводе компании ООО “Ламифил” (г. Углич Ярославской обл.) – дочернего предприятия компании LAMIFIL (Бельгия). Предприятие выпускает качественную продукцию, но по западной технологии. В то же время в нашей стране есть возможность наладить производство проводниковой продукции по собственной технологии, не уступающей мировым аналогам. При этом необходимо решить вопросы повышения пропускной способности и одновременно прочности ПНП.

Одним из путей решения этих вопросов является применение проводов из алюминиевого сплава с пониженным электрическим сопротивлением и без использования стального сердечника, в отличие от проводов АС. При правильной постановке производства создание подобных проводов возможно в России, и в перспективе это позволит с успехом заменить существующие сталеалюминиевые провода. В частности, подобные ПНП выпускает ООО “Камкабель” (г. Пермь) под маркой АСП. В отличие от сталеалюминиевых – это алюминиевый компактированный провод без стального сердечника. Максимальная рабочая температура про-

<sup>1</sup> Шакиров Рауль Гаянович: rshakir@bk.ru

вода – 90°C, временное сопротивление разрыву – 295 МПа, что превышает усреднённую прочность (к общей площади) провода АС. Продукция компании прошла испытания на действующих ВЛЭП в сетях ООО “Башкирэнерго” и по результатам этих испытаний по заказу ООО “Камский кабель” составлено совместное заключение Уфимского государственного авиационного технического университета (ФГБОУ ВО “УГАТУ”) и ООО “Башкирэнерго” [6].

**Электрические, механические и термические свойства алюминиевых сплавов для ПНП.** Перспективность проводов из алюминиевого сплава без стального сердечника обусловлена несколькими факторами. Проводимость стали в 4 раза меньше проводимости алюминия. Плотность стали – 7,8 г/см<sup>3</sup>, и, соответственно, удельный вес 1 м стального провода в 3 раза больше алюминиевого провода аналогичного диаметра (плотность Al – 2,6 г/см<sup>3</sup>). В результате, например, в проводе АС-240/32 (соотношение сечений алюминиевой жилы/стального сердечника – 7,7) наличие стального сердечника уменьшает проводимость примерно на 12% и увеличивает массу на 25% [7] по сравнению с проводом того же сечения из алюминия. Также к недостаткам традиционных проводов АС относится низкая критическая температура нагрева – до 70°C, поскольку при более высоких температурах провода из алюминия марки А5Е [8] интенсивно разупрочняются, что приводит к преждевременному старению провода. Стальной сердечник обеспечивает необходимую прочность проводов АС, не позволяя им потерять работоспособность.

**Таблица 1**

**Свойства наноструктурированных сплавов системы Al-PЗМ, полученных в результате ИПД и последующих отжигов [21]**

Сплав	Обработка	Временное сопротивление/предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Электропроводность	
			$\alpha$ , МСм/м	IACS, %
Al (99,5%)	ИПД	195	35,2	60,7
Al-2,5PЗМ	ИПД	297	32,8	56,6
	+230°C	225	34,9	60,2
Al-4,5PЗМ	ИПД	580	26,4	45,5
	+230°C	585	29,2	50,3
	+280°C	500	30,3	52,2
	+400°C	192	33,3	57,4
Al-8,5PЗМ	ИПД	537	23,0	40,7
	+230°C	542	25,0	44,7
	+280°C	553	25,9	45,8
	+400°C	274	30,4	52,4

Провода из исследуемых алюминиевых сплавов (Al-сплавов) могут иметь прочность не меньшую, чем прочность проводов АС, и при определенных показателях электропроводности и прочности (при аналогичных массе и диаметре) будут иметь значительно большую электропроводность, чем провода АС. Таким образом, возможно повышение пропускной способности существующих ВЛЭП без установки новых опор, а только за счёт замены сталеалюминиевых проводов на провода большей проводимости из Al-сплавов. Эквивалентная или более высокая прочность является важным требованием при замене проводов АС на новые провода.

Известно, что прочность Al-сплавов обеспечивается повышением содержания легирующих компонентов, но при этом, как правило, проводимость резко снижается. Однако, как показывают исследования, проведённые авторами [9 – 11], значительно повысить прочность Al-сплавов с сохранением и даже некоторым повышением электропроводности можно за счёт наноструктурирования – измельчения зёрен кристаллической решётки сплава до наноразмеров (от 500 до 100 нм) с использованием интенсивной пластической деформации (ИПД), в процессе которой осуществляются большие деформации ( $\epsilon \geq 4$ ) заготовки (будущей проволоки) определёнными методами [9, 12, 13].

Проведённые исследования [10, 11] показали, что ИПД может быть эффективным направлением достижения повышенных эксплуатационных свойств токопроводящих материалов и поэтому представляет большой практический интерес для электроэнергетики. В настоящее время разработаны технологические подходы, позволяющие получать длинномерные прутки (проволоки) наноструктурных алюминиевых сплавов (НС-Al-сплавов) [14 – 16], которые при доработке могут быть внедрены (вставлены в технологическую цепочку) на существующих производствах проводов АС.

В [11] опубликованы результаты исследований и лабораторных испытаний экспериментальных образцов проводниковых НС-Al-сплавов:

**Таблица 2**

**Свойства сплавов системы Al-Fe до и после ИПД-обработки [22]**

Сплав	Временное сопротивление / предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Электропроводность	
		$\alpha$ , МСм/м	IACS, %
Al-2Fe (исходный)	95	32,4	55,8
Al-2Fe (после ИПД)	649	23,4	40,4
Al-4Fe (исходный)	88	31,2	54,2
Al-4Fe (после ИПД)	340	27,8	48,0

сплав Al-Mg-Si (магний 0,8%, кремний 0,5%, остальное – алюминий) ГОСТ Р МЭК 62004-2014 [17];

сплавы Al-2Fe, Al-4Fe (с содержанием железа 2 и 4% соответственно);

сплавы Al-2,5P3M, Al-4,5P3M Al-8,5P3M (P3M – редкоземельные металлы: лантан и церий, с содержанием 2,5, 4,5 и 8,5% соответственно).

В работах [11, 14] также представлены результаты исследования свойств HC-Al-сплавов системы Al-Zr с содержанием циркония до 0,4% и магния до 0,5% или без него.

Известны также исследования проводниковых сплавов на основе алюминия, например, Al-Zr, Al-Yb и др. [18 – 20], в которых авторы добились некоторого улучшения прочности и электропроводности, используя традиционные технологии.

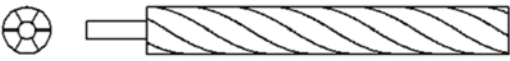
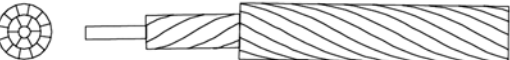
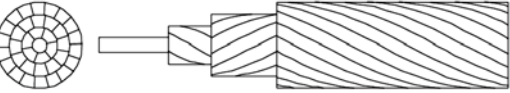
В настоящей статье рассматриваются HC-Al-сплавы системы Al-Mg-Si, Al-Fe, Al-P3M [11, 20 – 22], поскольку демонстрируемый ими в наноструктурированном состоянии уровень физи-

ко-механических характеристик полностью соответствует требованиям, предъявляемым к ПНП.

Так, сплав Al-4,5P3M после процесса интенсивной пластической деформации приобретает прочность до 585 МПа [11, 21, 23 – 27] (для сравнения: провод AC-240/32 имеет предел прочности 270 МПа [28]), но при этом снижается его электропроводность с 60 до 45% IACS (IACS – International Annealed Copper Standard / Международный стандарт отожжённой меди – принимается за 100%). Для увеличения электропроводности сплав проходит процесс отжига в соответствии со стандартом [29] при температуре от 200 до 400°C. Отжиг при 400°C приводит к увеличению электропроводности до 57% IACS и к уменьшению прочности материала до 190 МПа [11, 21]. Но в то же время, отжиг позволяет поднять рабочую температуру провода. Отжиг образцов сплавов системы Al-P3M при 400°C в течение 1 ч (согласно стандарту) эквивалентен эксплуатации при 310°C в течение 400 ч, или 210°C в течение 40 лет соответ-

Таблица 3

Каталог смоделированных проводов с расчётными геометрическими параметрами

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> (аналог по сечению провода AC)	Фактическое (расчётное) сечение, мм <sup>2</sup>	Число проволок	Номинальный диаметр центральной проволоки, мм	Диаметр провода, мм
				
11,8 (10/1,8)	11,88	7	1,47	3,8893
18,7 (16/27)	18,61	7	1,84	4,8682
29,2 (25/4,2)	29,08	7	2,3	6,0852
41,2 (35/6,2)	41,28	7	2,74	7,2494
46,7 (40/6,7)	46,56	7	2,91	7,6991
58 (50/8,0)	58,07	7	3,25	8,5987
73,5 (63/10,5)	73,64	7	3,66	9,6834
81 (70/11)	81,07	7	3,84	10,1597
111 (95/16)	110,84	7	4,49	11,8794
116,7 (100/16,7)	116,84	7	4,61	12,1969
				
139 (120/19)	138,82	19	3,05	13,2946
169 (150/19)	169,47	19	3,37	14,6895
209 (185/24)	208,73	19	3,74	16,3023
				
276 (240/32)	275,6722	37	3,08	18,7349
339 (300/39)	339,8942	37	3,42	20,803
360 (330/30)	360,0617	37	3,52	21,4113
427,7 (400/27,7)	428,5032	37	3,84	23,3578
481,1 (450/31,1)	481,3716	37	4,07	24,7568
534,6 (500/34,6)	534,8182	37	4,29	26,0951

венно. Из этого можно сделать вывод, что конечный продукт – провод из таких сплавов – будет работать при рабочих температурах, в 2 раза и более превышающих рабочую температуру провода АС [30] в течение всего времени эксплуатации.

В табл. 1 представлены различные варианты деформационно-термической обработки сплавов Аl-РЗМ и их свойства по результатам такой обработки [11, 21, 27]. Данные отражены в сравнении с чистым алюминием. Изменения в свойствах НС-сплавов позволяют выбрать оптимальный вариант характеристики “прочность – электропроводность – термостойкость” в зависимости от типа электропроводящей линии (воздушная линия, воздушная линия с применением изолированных самонесущих проводов, кабельная линия [28] и т.д.) и в зависимости от условий её работы.

Из данных табл. 1 видно, что увеличение прочности материала наблюдается не только после ИПД, но также и после отжига при 230°C (в случае НС-сплавов с содержанием РЗМ 4,5 и 8,5%).

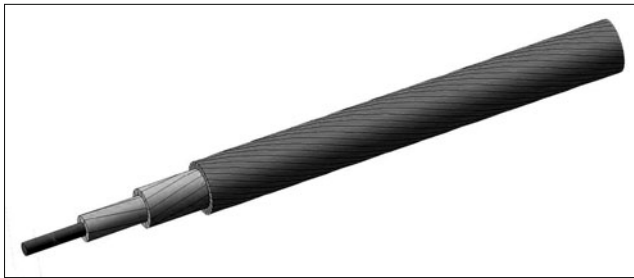
Заметное уменьшение прочности отмечается лишь после отжига при 400°C. Из полученных экспериментальных данных также следует, что увеличение температуры отжига положительным образом сказывается на электрической проводимости НС-сплавов.

В табл. 2 представлены результаты исследования физико-механических свойств сплавов системы Аl-Fe в исходном литом состоянии, а также в наноструктурированном состоянии, сформированном в результате ИПД. Несмотря на значимую разницу в содержании железа, в исходном состоянии оба сплава имеют сравнимый предел прочности (примерно 90 МПа). После ИПД-обработки прочность сплавов значительно возрастает, особенно в системе Аl-2Fe, однако в сравнении с ним у сплава Аl-4Fe становится выше проводимость.

Из данных табл. 2 видно, что прочность сплавов системы Аl-Fe зависит от содержания Fe. Ещё одно существенное различие от сплавов системы Аl-РЗМ заключается в том, что в алюминиевой

**Таблица 4**  
**Сравнительная таблица проводов**

Параметры провода	Существующие провода				Смоделированные провода					
	АС-240/32	АСп 275	AACSRZ 251	AA-AC-Z261-2Z	НС-Аl 276 (Аl-0,58Mg-0,54Si)	Аl-2Fe 276	Аl-4Fe 276	Аl-2,5P3M 276	Аl-4,5P3M 276	Аl-8,5P3M 276
Марка провода	АС-240/32	АСп 275	AACSRZ 251	AA-AC-Z261-2Z	НС-Аl 276 (Аl-0,58Mg-0,54Si)	Аl-2Fe 276	Аl-4Fe 276	Аl-2,5P3M 276	Аl-4,5P3M 276	Аl-8,5P3M 276
Производитель	Кабельные заводы РФ	“Камский кабель” (г. Пермь)	ООО “Лами-фил” (г. Углич)		–					
ГОСТ, ТУ	839-80	16.К180-030-2011	3510-001-699-48333-2012		–					
Изображение										
Масса 1 км провода, кг	921	743	875	742	746	746	774,4	743,9	765,4	808,6
<i>Геометрические размеры</i>										
S общее / S сердечника, мм <sup>2</sup>	275,7 / 31,7	275,2 / –	251,4 / 34,4	265,7 / –	275,7 / –					
D <sub>пр</sub> , мм	21,6	19,7	19,1	19,6	18,7					
<i>Механическая прочность</i>										
P <sub>p</sub> , Н	75 045	81 200	124 300	86 350	82 800	64 032	80 592	81 972	138 000	152 628
σ <sub>p</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	272,2	295,0	494,4	325	300	327	292	297	500	553
E, Н/мм <sup>2</sup>	77 000	62 000	74 900	56 800	70 000	69 725	70 951	67 625	66 950	65 562
σ <sub>max</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	122,5	132,7	197,8	130	135	104,4	131,4	133,6	225	248,8
σ <sub>с</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	81,7	88,5	148,3	97,5	90	69,6	87,6	89,1	150	165,9
<i>Электрические и тепловые характеристики</i>										
ρ, Ом/км	0,1182	0,1256	0,1538	0,1252	0,1174	0,1142	0,1224	0,1105	0,1196	0,1399
α, 10 <sup>-6</sup> /°C	19,82	24,2	19	23	21	21,9	21,7	21,8	21,5	20,9
t <sub>max</sub> , °C	70	90	90	90	120	120	120	140	180	180
I <sub>max</sub> , А	605	745	651	744	935	1150	1110	1260	1360	1260



Модель провода с проволокой из наноструктурированного алюминиевого сплава

руде уже содержится до 5% железа. Это означает, что получение сплавов Al-Fe не требует дополнительного процесса легирования [11]. Кроме того, алюминий и железо являются одними из самых дешёвых элементов в природе. Сплавы системы Al-PЗМ дороже. Однако запасов этих элементов в природе достаточно для производства проводниковой продукции на основе сплавов Al-PЗМ [31].

**Конструирование и расчёт укладки жил проводов из алюминиевых сплавов.** Конструирование проводов из HC-Al-сплавов на начальной стадии можно произвести на основании имеющегося опыта конструирования сталеалюминиевых проводов, который подробно описан в [32, 33]. В соответствии с правилами расчёта и укладки жил провода, изложенными в данных работах, окончательный расчёт площади сечения выполняется на основании имеющихся данных о числе повивов провода, площади сечения центральной проволоки, а также о диаметре проволоки на внешних повивах.

Геометрические параметры рассчитываемого провода определяются по формуле

$$S = \frac{K\pi d^2}{4},$$

где  $K = 3n(n - 1) + 1$  – общее число проволок в проводе,  $n$  – число повивов;  $d = \sqrt{\frac{4S_n}{\pi}}$  – диаметр

проволоки, мм;  $S_n = \frac{S}{K}$  – площадь сечения проволоки, мм<sup>2</sup>.

Для рассматриваемого провода сечением 276 мм<sup>2</sup> (см. далее табл. 3, 4) рассчитаем параметры:

$$K = 3 \cdot 4(4 - 1) + 1 = 37,$$

здесь число повивов берётся равным 4, как в проводе AC-240/32, причём стальной сердечник принимается за первый повив; сечение проволоки

$$S_n = \frac{276}{37} = 7,46 \text{ мм}^2,$$

отсюда диаметр проволоки

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,46}{\pi}} = 3,08 \text{ мм},$$

а фактическое (расчётное) сечение провода при этом равно

$$S = \frac{37 \cdot \pi \cdot 3,08^2}{4} = 275,53 \text{ мм}^2.$$

Приведённая методика была опробована в работе [34] для моделирования провода из сплава Al-Mg-Si сечением 276 мм<sup>2</sup>. По выполненным расчётам разработана модель наноструктурного провода. Укладка жил выполнена методом скрутки.

Скрутки токопроводящих жил носят названия правильная и шнуровая. Правильная скрутка бывает нормальной и комбинированной. Здесь применена правильная нормальная скрутка. Жилы, скрученные таким методом, состоят из проволок одинакового сечения (при комбинированной правильной скрутке площади сечений проволок наружных и внутренних повивов различаются). При правильной системе скрутки поверх одной центральной проволоки накладывается ещё один или несколько повивов, причём каждый следующий повив накладывается в направлении, противоположном предыдущему. Для создания проводов из HC-сплавов систем Al-Fe и Al-PЗМ рассматривается также нормальная правильная скрутка. Поэтому провода будут состоять из одной центральной проволоки круглого сечения и повивов с трапециевидными проволоками площадью, совпадающей с площадью центральной.

Число повивов принимается таким же, как и для повивов сталеалюминиевых проводов. Однако в отличие от проводов AC, проектируемые проволоки, имея трапециевидную форму, укладываются плотно друг к другу, исключая воздушные зазоры между собой. Такой метод укладки позволяет впоследствии рассматривать провод как компактированный, каковыми и являются практически все современные провода [1 – 3, 5].

На рисунке показана 3D-модель такого провода. Число повивов в нём будет зависеть от сечения провода.

Расчёт сечений проводов выполняется по методике расчётов [32 – 34]. Каталог смоделированных проводов с расчётными параметрами представлен в табл. 3.

**Расчёт токовых нагрузок сконструированных проводов.** Длительно допустимые токовые нагрузки для новых проводов рассчитаны по известной формуле

$$I_d = \sqrt{\frac{P_b - P_c}{k_m k_n R_{20} [1 + \beta_r (\vartheta_d - 20)]}} \quad (1)$$

в соответствии с новой методикой, изложенной в [35] и подробно описанной в [5] для ПНП компа-

нии ООО «Ламифил» с применением программного обеспечения [36] и [37].

В формуле (1):  $P_{\text{в}} = \alpha F(\vartheta_{\text{д}} - \vartheta_{\text{в}})$  – мощность, отдаваемая проводом в воздух за счёт конвективного теплообмена, Вт;  $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент, учитывающий действие конвекции;  $\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент, учитывающий действие теплового излучения;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\vartheta_{\text{д}}$  – допустимая температура провода, °С;  $\vartheta_{\text{в}}$  – температура воздуха, °С;  $R_{20}$  – сопротивление 1 м провода при температуре 20°С, Ом;  $\beta_r$  – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С.

Результаты расчётов представлены в итоговой табл. 4. Все параметры, необходимые для выполнения расчётов по формуле (1), например, географическая долгота и широта местности, высота над уровнем моря и др., приняты для региона Урала (Республика Башкортостан), аналогично статье [5]. Сечения всех представленных (существующих и смоделированных) проводов, сравниваемых в табл. 4, выбраны идентично проводу АС-240/32. Характеристики существующих проводов указаны в соответствии с их паспортными данными. Характеристики смоделированных проводов приведены на основе выполненных расчётов по программам [36, 37]. Со временем, при создании таких проводов, их расчётные данные могут быть скорректированы по результатам лабораторных и полевых испытаний. На основе таких испытаний будет составлен соответствующий каталог проводов.

## Выводы

1. Смоделированные провода, выполненные из наноструктурированных сплавов систем Al-Mg-Si, Al-Fe и Al-PЗМ в сравнении с проводами марки АС, а также с некоторыми современными проводами имеют, согласно проведённым расчётам, повышенную прочность, меньшее удельное электрическое сопротивление, повышенную термостойкость и, как следствие, увеличенный длительно допустимый ток.

2. При производстве проводов из таких сплавов, с использованием интенсивной пластической деформации, появляется возможность регулировать их основные параметры: электропроводность, прочность и термостойкость. Это открывает широкие возможности для заказа проводов при строительстве линий электропередачи в определённых условиях работы. Например, при строительстве воздушных и кабельных ЛЭП в промышленной зоне с большими токовыми нагрузками упор необходимо сделать на такие характеристики проводника, как повышенная проводимость и термостойкость, и выбрать провода системы Al-Mg-Si, Al-Fe. А при строительстве ВЛ в го-

лолёдно-ветровых или в горных районах будут востребованы провода с повышенной механической прочностью – провода системы Al-PЗМ. Такие провода по стоимости будут несколько выше, но за счёт своей прочности обеспечат надёжную работу ВЛ в тяжёлых климатических условиях.

3. В производстве проводов АС и ПНП очевидно принципиальное отличие. При выборе провода АС учитывается только его сечение, т.е. повышенная электропроводность, термостойкость или прочность определяется одним параметром – сечением провода и сечением его сердечника. При более тяжёлых условиях эксплуатации (большие токи, суровый климат и др.) выбирается провод с увеличенным сечением и, соответственно, с увеличенной массой, что, в свою очередь, приводит к увеличению числа опор и, в конечном итоге, удорожанию линии электропередачи.

При заказе ПНП можно выбрать провод с увеличенной электропроводностью и термостойкостью либо с увеличенной прочностью в зависимости от условий эксплуатации. По техническим условиям (ТУ), представленным заказчиком на приобретение провода, заводом-изготовителем будет составлен регламент по ИПД-обработке и отжигу провода для конкретных условий, указанных в ТУ. При этом несколько завышенная цена (по сравнению с проводом АС) может быть компенсирована в процессе строительства линии тем, что для таких проводов потребуется меньшее число опор. А при реконструкции существующей ВЛ замена устаревших проводов АС на провода с улучшенными электрическими и механическими характеристиками и при этом с гораздо меньшей массой, будет просто необходимым решением.

4. В сравнении с проводами АС, смоделированные провода из рассмотренных НС-Al-сплавов:

обладают повышенным, в 1,5 – 2 раза значением допустимого тока;

обладают большей на 50 – 110°С термостойкостью;

обладают большей механической прочностью (до 2 раз);

легче проводов АС аналогичного сечения на 14 – 23% из-за отсутствия стального сердечника;

имеют меньшие потери электроэнергии (на 16%) [25];

легче достигают заданный уровень свойств для конкретных условий эксплуатации, что может привести к снижению стоимости обслуживания ЛЭП.

5. Выпуск таких ПНП на территории России вполне возможен на существующих кабельных заводах. Продукция может быть конкурентоспособной на мировом рынке.

*Мурашкин М. Ю. выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку проекта № 17-19-01311.*

## Список литературы

1. Тимашиова, Л. В. Механические и электрические параметры проводов нового поколения [Текст] / Л. В. Тимашиова, А. С. Мерзляков, И. А. Назаров. – ОАО “НТЦ ФСК ЕЭС”, 2008. – 8 с.
2. Колосов, С. В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений [Текст] / С. В. Колосов, С. В. Рыжов / Третья Международная конференция “Многогранные гнутые стойки (МГС)”. – Крым, п. Николаевка, 2008.
3. Шакиров, Р. Г. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередачи [Текст]: уч. издание / Ф. Р. Исмагилов, Н. К. Потапчук, Т. Ю. Волкова. – М.: Машиностроение, 2015. – 211 с.
4. О Правительственной комиссии по импортозамещению [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 4 августа 2015 г. № 785. – (<http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/importsubstitution/order/20160429>).
5. Шакиров, Р. Г. Расчёт теплоотдачи с поверхности изолированных проводов нового поколения [Текст] / Р. Г. Шакиров, Н. А. Федоров // Электрические станции. – 2019, – № 1 – С. 28 – 33.
6. Шакиров, Р. Г. Об исследованиях инновационных проводов АТ1ПС / С-185 / 29 и АСП 185 производства ООО “Камский кабель” в условиях гололедных нагрузок [Текст] / Совместное заключение ФГБОУ ВПО “Уфимский гос. авиац. тех. университет” и ООО “Башкирэнерго”. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 28 с.
7. Гундеров, Д. В. Методы получения наноструктурных сплавов для проводов нового поколения. Перспективы применения в электроэнергетике [Текст] / Д. В. Гундеров, Р. Р. Саттаров, Р. Г. Шакиров // Доклад на Международной научно-практической конференции “Гололёдно-ветровые явления на воздушных линиях электропередачи”. – Уфа, 2016.
8. Алюминий первичный. Марки. Госстандарт России [Текст]: ГОСТ 11069 – 2001. – Введ. 2003 – 01 – 01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11 с.
9. Valiev, R. Z. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity [Text] / R. Z. Valiev, M. Yu. Murashkin, I. Sabirov // Scripta Materialia / – 2014. – No. 76. – P. 13 – 16 /
10. Murashkin, M. Yu. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity [Text] / M. Yu. Murashkin, I. Sabirov, X. Sauvage, R. Z. Valiev // Journal of Materials Science. – 2016. – No. 51. – P. 33 – 49.
11. Мурашкин, М. Ю. Особенности микроструктуры и физико-механические свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов для электротехнических применений [Текст] / М. Ю. Мурашкин, Е. В. Бобрук Т. С. Орлова, А. М. Мавлютов, А. Е. Медведев. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – 200 с.
12. Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
13. Валиев, Р. З. // Создание НС металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивную пластическую деформацию [Текст] / Р. З. Валиев // Российские Нанотехнологии. – 2006. – Т. 1. – С. 208 – 216.
14. Murashkin, M. Yu. Microstructure, strength, electrical conductivity and heat resistance of an Al-Mg-Zr alloy after ECAP-conform and cold drawing [Text] / M. Yu. Murashkin, A. E. Medvedev, V. U. Kazykhanov, G. I. Raab, I. A. Ovid'ko, R. Z. Valiev // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2016. – No. 47. – P. 16 – 25.
15. Mann, V. Kh. Nanostructured Wire Rod Research and Development in Russia [Text] / V. Kh. Mann, A. Yu. Krokhin, I. A. Matveeva, G. I. Raab, M. Yu. Murashkin, R. Z. Valiev // Light Metal Age. – 2014. – P. 26 – 29.
16. Medvedev, A. E. Fatigue Properties of Ultra-Fine Grained Al-Mg-Si Wire with Enhanced Mechanical Strength and Electrical Conductivity [Text] / A. E. Medvedev, A. Arutyunyan, I. Lomakin, V. Kazykhanov, N. Enikeev, G. I. Raab, M. Yu. Murashkin // Metals. – 2018. – No. 8(12):1034.
17. Проволока из термостойкого алюминиевого сплава для провода воздушной линии электропередачи [Текст]: ГОСТ Р МЭК 62004-2014. – Введ. 2016 – 01 – 01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 14 с.
18. Zhang, Y. Precipitation evolution of Al-Zr-Yb alloys during isochronal aging [Text] / Y. Zhang, W. Zhou, H. Gao, Y. Han, K. Wang, J. Wang [et al.] // Scripta Materialia. – 2013. – Vol. 69. – P. 477 – 480.
19. Zhang, Y.-Z. Effects of y addition on microstructure and properties of Al-Zr alloys [Text] / Y.-Z. Zhang, H.-Y. Gao, Y.-F. Wang, J. Wang, B.-D. Sun, S.-W. Gu [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). – 2014. – Vol. 24. – P. 2239 – 2243.
20. Белов, Н. А. Влияние отжига на структуру и механические свойства холоднокатаных листов Al-Zr сплавов [Текст] / Н. А. Белов, А. Н. Алабин, В. В. Истомина-Кастровский, Е. Г. Степанова // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2006. – № 2. – С. 14 – 18.
21. Medvedev, A. E. Enhancement of mechanical and electrical properties of Al-RE alloys by optimizing rare-earth concentration and thermo-mechanical treatment [Text] / A. E. Medvedev, M. Yu. Murashkin, N. A. Enikeev, R. Z. Valiev, P. D. Hodgson, R. Lapovok // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 745. – No. 15. – P. 696 – 704.
22. Medvedev, A. E. Optimization of Strength-Electrical Conductivity Properties in Al-2Fe Alloy by Severe Plastic Deformation and Heat Treatment [Text] / A. E. Medvedev, M. Yu. Murashkin, N. A. Enikeev, R. Z. Valiev, P. D. Hodgson, R. Lapovok // Advanced Engineering Materials. – 2017. – 1700867.
23. Valiev, R. Z. Nanostructured Aluminium Alloys produced via severe plastic deformation: New horizons in development [Text] / R. Z. Valiev, M. Yu. Murashkin, I. Sabirov // Mater. Sci. Eng. A. – 2013. – No. 560. – P. 1 – 24.
24. Валиев, Р. З. Использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов [Текст] / Р. З. Валиев, Г. И. Рааб, М. Ю. Мурашкин // КШП. – 2008. – № 11. – С. 5 – 12.
25. Шакиров, Р. Г. Применение проводов нового поколения на воздушных линиях электропередачи. Перспективы и пути решения [Текст] / Р. Г. Шакиров, Д. В. Гундеров // Международная научно-практическая конференция “Гололёдно-ветровые явления на воздушных линиях электропередачи”. – Уфа: Ежегодный энергетический форум, 2014.
26. Гатауллина, М. В. Алюминиевые наноструктурные проводники с повышенными эксплуатационными свойствами для электроэнергетики [Текст] / М. В. Гатауллина, Д. В. Гундеров, Р. Г. Шакиров // Всероссийская конференция-школа с международным участием “Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах”. – Уфа: Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, 2019.
27. Саттаров, Р. Р. Конструирование и расчёт проводов из современных алюминиевых сплавов [Текст] / Р. Р. Саттаров, Р. Г. Шакиров // II Всероссийская научно-практическая конференция “Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники”. – Казань: Казанский гос. энергетический университет, 2020.
28. Правила устройства электроустановок [Текст]: ПУЭ-2003; раздел 2; изд. 7, перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2003. – 158 с.

29. *International standard. Thermal resistant aluminum alloy wire for overhead line conductor* [Text]: IEC 62004, 2007.
30. *Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи* [Текст]: ГОСТ 839–80. – Введ. 1981–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 15 с.
31. *Лантан* [Electronic resource]. – ([www.chemicals-el.ru / chemicals-1082-1.html](http://www.chemicals-el.ru/chemicals-1082-1.html)).
32. *Безносков, Б. Д.* Кабели и провода. Т. 1. Основы теории, расчет и конструирование: учебное пособие для электротехнических техникумов [Текст] / Б. Л. Безносков [и др.]. – М.-Л.: Гос. энерг. изд-во, 1959. – 560 с.
33. *Кранихфельд, Л. И.* Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов [Текст]: учебник для техникумов / Л. И. Кранихфельд, И. Б. Рязанов. – М.: Высшая школа, 1972. – 384 с.
34. *Пискунов, Ю. В.* Неизолированные провода, повышение пропускной способности, предельные токовые нагрузки, допустимая температура, программа для ЭВМ [Текст]: выпускная квалификационная диссертация. – Уфа: УГАТУ. – 2017. – 85 с.
35. *Методика* расчёта предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий [Текст]: СТО 56947007–29.240.55.143–2013. – ОАО “ФСК ЕЭС”, 2013.
36. *Шакиров, Р. Г.* Механический расчёт воздушных линий электропередачи [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617907 / Р. Г. Шакиров, Н. Ф. Ахметов, Ю. В. Пискунов.
37. *Шакиров, Р. Г.* Расчёт предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий [Текст]: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617908 / Р. Г. Шакиров, Ю. В. Пискунов, Н. Ф. Ахметов.