

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ALUMINIUM AND ITS ALLOYS FOR THE DOMESTIC CABLE INDUSTRY

V.V. Loparev, *Cand. Sc. (Engineering), Head of Laboratory, JSC VNIIEK*

В.В. Лопарев, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией ОАО «ВНИИКП»*

Аннотация. Рассмотрены марки алюминия и алюминиевых сплавов, применяемые отечественной кабельной промышленностью. Показана взаимосвязь свойств алюминиевых сплавов с их фазовым составом и термообработкой. Приведены выдержки из нормативных документов по техническим требованиям, предъявляемым к различным маркам алюминия и его сплавов, а также к катанке и проволоке из них. Отражены отличительные свойства алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: сплавы, марки, химический состав, примеси, термообработка, фазы, свойства, технические требования, катанка, проволока

Abstract. The article addresses the aluminium and aluminium alloy grades used by the domestic cable industry. The interrelation of the properties of aluminium alloys with their phase composition and heat treatment is shown. Extracts from the normative documents on the technical requirements for various grades of aluminium and its alloys, as well as for rod and wire made of them, are presented. The distinctive properties of aluminium alloys are indicated.

Key words: alloys, grades, chemical composition, impurities, heat treatment, phases, properties, technical requirements, rod, wire

*Материал поступил в редакцию 13.10.2022
E-mail: v.loparev@vniiekp.ru*

Целью статьи является обобщение сведений, содержащихся в научно-технической литературе и нормативных документах, по алюминию и алюминиевым сплавам, предназначенным для применения в отечественной кабельной промышленности.

Из группы металлов высокой проводимости, к которой относятся серебро, медь, золото и алюминий (в порядке возрастания удельного электросопротивления), в кабельной технике нашли применение главным образом медь и алюминий, как наиболее доступные.

В свою очередь алюминий, обладая хорошей электропроводностью (65 % от меди), но являясь в 3 раза дешевле меди, составляет ей серьёзную конкуренцию в кабельных изделиях. Это демонстрирует табл. 1. В ней приведена доля алюминия (с учётом его сплавов) в общей сумме металлов (Cu + Al) в кабельных изделиях предприятий, входящих в Ассоциацию «Электрокабель», за период с 1990 по 2021 год.

Из табл. 1 следует, что с 1990 до 2014 года доля алюминия в кабельных изделиях увеличилась в 2 раза. Но, начиная с 2014 года, доля алюминия перестала увеличиваться и осталась на уровне 32–34 %. Возможно это объясняется некоторыми ограничениями в применении алюминия, обусловленными его свойствами. Так, наличие на поверхности алюминия непроводящей оксидной плёнки ухудшает его коммутационные возможности [1]. Более низкие значения электропроводности и прочностных свойств по сравнению с медью также накладывают некоторые ограничения на расширение применения алюминия в кабельных изделиях. Получается, что в тех изделиях, где была возможность заменить медь, алюминий её заменил. Там же, где это сделать было невозможно или нецелесообразно, медь осталась незаменимой. Видимо, этим и объясняется тот «паритет», который установился между алюминием и медью в последние годы.



Таблица 1

Доля алюминия, применяемого в кабельной промышленности (по данным Ассоциации «Электрокабель»)

Годы	1990	1998	2007	2014	2017	2018	2019	2020	2021
Al, %	16	23	29	35	34	34	32	32	33

Таблица 2

Химический состав алюминия для электротехнических целей (выдержка из ГОСТ 11069)

Марка	Примесь, не более, % масс.									Основна Al, не менее
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	Сумма Ti +V + Cr + Mn	Прочие примеси (ка- ждая в отдельности)	
A8	0,10	0,12	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01 ¹	0,02	99,80
A7E	0,08	0,20	0,01	–	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02	99,70
A5E	0,10 ²	0,35 ³	0,02	–	0,03	0,04	0,03	0,015	0,02	99,50

Примечания. ¹Только для Ti.

²В алюминии А5Е, идущем на изготовление полутвёрдой катанки марки А5Е-ПТ по ГОСТ 13843, допускается массовая доля кремния не более 0,12 %.

³Массовая доля Fe должна быть не менее 0,18 %.

Основными нормативными документами, по которым производят алюминий и алюминиевые сплавы – ГОСТ 11069–2019 «Алюминий первичный. Марки» и ГОСТ 4784–2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».

Далее будут рассмотрены основные марки алюминия и его сплавов, выпускаемые отечественной промышленностью для изготовления проволоки, проводов и токопроводящих жил (ТПЖ) кабелей. При этом выдержки из нормативных документов приведены с учётом электротехнического назначения рассматриваемых материалов.

При изложении материала поддерживалась следующая последовательность описания: «марка (химсостав) – катанка – проволока».

1. Алюминий

Для изготовления продукции электротехнического назначения применяется алюминий технической чистоты марок А5Е, А7Е и реже – марки А8. Буква «Е» указывает на электротехническое предназначение марок алюминия.

Термической обработкой алюминий не упрочняется. Для повышения прочностных свойств используется деформационное упрочнение (нагартовка), в частности, прокатка и волочение. Для полного разупрочнения алюминия в нагартованном состоянии применяют отжиг при температурах 300–500 °С с охлаждением на воздухе или в воде. Для частичного сня-

тия упрочнения нагартованного алюминия проводят отжиг при температурах 150–300 °С.

1.1. Требования к химическому составу алюминия определены в ГОСТ 11069–2019 «Алюминий первичный. Марки» и приведены в табл. 2.

Примеси, присутствующие в алюминии, понижают его пластичность, электро- и теплопроводность. Основные и наиболее вредные из них – Fe и Si. Железо и кремний практически не растворимы в твёрдом алюминии и образуют тройные промежуточные фазы α (Fe₂SiAl₆) и β (FeSiAl₅), которые приводят к повышению прочности, но снижению пластичности и электропроводности. Причём, для получения наибольшей электропроводности придерживаются соотношения железа к кремнию по массе около 2.

Алюминий, как и его сплавы, выпускают на металлургических предприятиях в виде чушек, цилиндрических слитков, слябов, которые на следующей стадии технологического передела превращают в катанку. Катанка и является тем исходным полуфабрикатом, который поступает на кабельные заводы.

1.2. Требования к катанке из алюминия отражены в ГОСТ 13843–2019 «Катанка из алюминия. Технические условия».

Химический состав катанки приведён в табл. 3, а механические и электрические свойства – в табл. 4.

Таблица 3

Химический состав катанки из алюминия (выдержка из ГОСТ 13843)

Марка катанки	Al, не менее	Массовая доля, %, не более								
		Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ga	B	Сумма Ti + V + Cr + Mn	Прочие примеси (каждая в отдельности)
A8	99,80	0,08	0,12	0,01	0,02	0,03	0,02	0,008	0,010	0,02
A7E	99,70	0,10	0,20	0,01	0,02	0,04	0,03	0,008	0,010	0,02
A5E	99,50	0,10	0,35 ¹	0,02	0,03	0,04	0,03	0,008	0,015	0,02

Примечание.

¹Массовая доля Fe должна быть не менее 0,18 %.

Таблица 4

Механические и электрические свойства алюминиевой катанки (выдержка из ГОСТ 13843)

Марка катанки	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, 10 ⁻⁶ Ом·м, не более	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %, не менее
A8-ПТ	0,02780	70–100	20
A5E-M (A5E-M-O) A7E-M (A7E-M-O)	0,02780 0,02770	60–85	30
A5E-ПТ A7E-ПТ	0,02800 0,02790	83–105	15
A5E-T1 A7E-T1	0,02800 0,02790	98–125	12
A5E-T2 A7E-T2	0,02810 0,02800	105–135	10
A5E-T3 A7E-T3	0,02810 0,02810	110–150	5

По состоянию поставки катанку производят мягкой (обозначение М), полутвёрдой (ПТ) и твёрдой с группами твёрдости Т1, Т2 и Т3. Дополнительная буква «О» в обозначении мягкой катанки указывает, что катанка находится в термообработанном состоянии.

Отметим, что катанка из алюминия и алюминиевых сплавов по действующим стандартам должна выдержать технологическую пробу волочением. При этом испытания проводит потребитель.

Суть этого испытания состоит том, что из катанки волочат проволоку до диаметра 1,7–2,8 мм (в зависимости от диаметра исходной катанки) при скорости волочения не более 12 м/с. При этом коэффициент вытяжки не должен превышать 1,33, а смазку применяют на основе масла.

Для алюминиевой катанки не должно быть более одного обрыва на 2 тонны катанки по дефектам металлургического характера (раковины, шлаковые или оксидные включения). При этом допускаются обрывы, если в месте обрыва отсутствуют дефекты ме-

таллургического характера. Число таких обрывов вышеуказанным стандартом не оговаривается.

Представляется, что в технологической пробе волочением заложена некоторая неопределённость. Организационно получается, что изготовитель отпускает потребителю катанку, до конца не удостоверившись в её качестве, то есть «доверяет» потребителю проверять катанку волочением на его технологическом оборудовании. При этом могут быть различия в состоянии волочильного оборудования, применяемой смазки у разных потребителей катанки. Кроме того, отнести причину обрыва к дефектам металлургического характера бывает весьма затруднительно. Поэтому проведение пробы волочением у потребителя сопряжено с некоторыми рисками для производителей катанки. Возможно, из-за этого в стандарте на медную катанку проба волочением отсутствует.

Конечным результатом волочения катанки является проволока, которая идёт на изготовление проводов и ТПЖ.



Таблица 5
Временное сопротивление и относительное удлинение алюминиевой проволоки электротехнического назначения по ТУ 16.К71-088-90

Номинальный диаметр проволоки, мм	Проволока марок					
	АТ		АПТ		АМ	
	временное сопротивление, МПа	относительное удлинение, %	временное сопротивление, МПа	относительное удлинение, %	временное сопротивление, МПа	относительное удлинение, %
	не менее		не менее		не менее	
0,100	98	0,5	-	-	-	-
Св. 0,100 до 0,300	118	0,5				
« 0,30 « 0,50	157	0,7				
« 0,50 « 0,60	176	1,0				
« 0,60 « 1,00	167	1,0	88-137	2,0	74-98	10
« 1,00 « 1,50	167	1,0				15
« 1,50 « 2,50	167	1,3				18
« 2,50 « 4,00	162	1,5				20
« 4,00 « 5,00	157	2,0				20
« 5,00 « 10,00	147	2,0				25
« 10,00 « 14,00	-	-				3,0
« 14,00 « 18,00			30			

Таблица 6
Число перегибов проволоки марок АТ и АПТ

Номинальный диаметр проволоки, мм	Число перегибов, не менее, для проволоки марок	
	АТ	АПТ
От 1,50 до 2,59	8	18
Св. 2,59 до 3,50	8	16
« 3,50 « 5,00	7	14

1.3. Алюминиевая проволока выпускается по двум ТУ:

- а) проволока электротехнического назначения;
- б) проволока для проводов воздушных линий электропередачи.

1.3.1. Требования к алюминиевой проволоке электротехнического назначения отражены в ТУ 16.К71-088-90 «Проволока алюминиевая круглая электротехническая». Алюминиевая проволока в зависимости от состояния выпускается марок: АМ – мягкая, АПТ – полутвёрдая и АТ – твёрдая.

Удельное электросопротивление проволоки марки АМ не должно превышать $0,0280 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, проволоки марок АПТ и АТ – не более $0,0283 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Временное сопротивление и относительное удлинение после разрыва алюминиевой проволоки электротехнического назначения в зависимости от диаметра представлены в табл. 5.

Проволока марок АТ и АПТ диаметром 1,50–5,00 мм должна выдерживать определённое число перегибов, указанных в табл. 6.

Число перегибов у проволоки марки АМ, а также у проволоки марок АТ и АПТ номинальным диаметром менее 1,50 мм и более 5,00 мм не нормируется.

1.3.2. Для проводов воздушных линий электропередачи применяется проволока марки АВЛ. Эта проволока прочнее, чем твёрдая проволока марки АТ, выпускаемая по ТУ 16.К71-088-90. Требования к проволоке АВЛ отражены в ТУ 16-705.472-87 «Проволока

Таблица 7
Механические свойства проволоки марки АВЛ
по ТУ 16-705.472–87

Диаметр, мм	Временное сопротивление, МПа не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Число перегибов, не менее
1,25	200	1,0	–
Св. 1,25 до 1,50 вкл.	195		
« 1,50 « 1,75 «	190	1,5	8
« 1,75 « 2,00 «	185		
« 2,00 « 2,25 «	180		
« 2,25 « 2,50 «	175		
« 2,50 « 3,00 «	170		
« 3,00 « 3,50 «	165		
« 3,50 « 5,00 «	160	2,0	7

алюминиевая круглая для проводов воздушных линий электропередачи».

Удельное электрическое сопротивление проволоки марки АВЛ не должно превышать $0,028264 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Основные механические свойства проволоки марки АВЛ приведены в табл. 7.

Верхний предел рабочих температур для проволоки из алюминия разных марок, как и для алюминиевых сплавов, кроме высокотемпературных марок АТ, составляет 90 °С.

Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы получают введением в алюминий легирующих элементов. Конечные структура, фазовый состав и свойства получаемых сплавов определяются диаграммой состояния алюминия с вводимыми элементами, а также режимами охлаждения из расплава и последующей термообработки в случае её проведения.

На сегодняшний день известно более 100 марок литых и деформируемых алюминиевых сплавов, применяемых в промышленности. Для изготовления кабельных изделий применяют только деформируемые сплавы. Требование к возможности деформирования сплавов вызвано необходимостью получать катанку и проволоку из неё с использованием методов обработки металлов давлением, в частности, прокатки и волочения.

Алюминиевые деформируемые сплавы, применяемые в кабельной промышленности, можно разделить на 3 группы в зависимости от систем легирующих элементов. Основные легирующие элементы этих групп определяют отличительные физико-механические и электрические свойства получаемых сплавов. Это следующие группы:

- высокопрочные сплавы на основе системы Al–Si–Mg;
 - сплавы на основе системы Al–Fe, обладающие уменьшенной ползучестью под нагрузкой;
 - термостойкие сплавы на основе системы Al–Zr.
- Химический состав алюминиевых деформируемых сплавов наряду с алюминием приведён в ГОСТ 4784–2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».

2. Высокопрочные сплавы на основе системы Al–Si–Mg

Для получения сплавов с повышенным уровнем прочностных свойств по отношению к алюминию в качестве основных легирующих элементов вводят кремний и магний. Эти элементы имеют высокую растворимость в твёрдом алюминии, резко снижающуюся с понижением температуры. В результате этого при охлаждении сплавов системы Al–Si–Mg из твёрдого раствора выделяется, как основная, интерметаллидная фаза Mg_2Si , а при нагреве эта фаза растворяется [2]. Такое фазовое превращение позволяет влиять на структуру и свойства сплавов посредством термической обработки.

В результате термической обработки (закалка и старение) матрицей сплава становится твёрдый раствор алюминия, упрочнённый дисперсными частицами интерметаллидных фаз β' и β'' (Mg_2Si). В присутствии в сплаве железа выделяются также в небольшом количестве интерметаллиды составов $Al_8Fe_2Si_6$, $Al_8FeMg_3Si_6$, Al_5FeSi и Al_3Fe . Два последних интерметаллида имеют вредную иглообразную форму частиц [3].

Легирование алюминия кремнием и магнием в небольших количествах (до 1 % каждого) несколько ухудшает электропроводность, но упрочняет сплав,



практически не ухудшая его пластичность и коррозионную стойкость. Добавки железа способствуют измельчению структуры, и за счёт этого у сплавов повышаются прочностные свойства.

Из многочисленной группы сплавов системы Al–Si–Mg в кабельной промышленности нашли применение сплавы только трёх марок: ABE, 6101 и 6201.

Сплавы системы Al–Si–Mg применяются там, где необходимо обеспечить высокую разрывную прочность и малую массу кабельных изделий. Это, в первую очередь, важно для проводов воздушных линий электропередачи. С применением проволок из сплавов системы Al–Si–Mg производят самонесущие изолированные провода (СИП) для сетей низкого и среднего напряжения. Также изготавливают с применением этих сплавов однородные неизолированные

провода для воздушных линий электропередачи марок АН, АЖ, А1, А2 и сталеалюминиевые провода марки А2Свп по ГОСТ 839–2019.

2.1. Химический состав сплавов марок ABE, 6101 и 6201 приведён в табл. 8.

Кроме основных легирующих элементов (Si и Mg) в составе сплавов присутствуют также марганец, медь и хром. Наличие этих элементов приводит к дополнительному упрочнению сплавов после естественного или искусственного старения.

Благотворное влияние марганца и хрома заключается в повышении коррозионной стойкости сплавов. Марганец и хром препятствуют, кроме того, образованию выделений из твёрдого раствора по границам зёрен. В отличие от указанных элементов медь вызывает снижение коррозионной стойкости, то есть уве-

*Таблица 8
Химический состав сплавов марок ABE, 6101 и 6201 по ГОСТ 4784–2019 (при производстве катанки электротехнического назначения)*

Обозначение		Массовая доля элемента, не более, если не указаны пределы, %								
Буквенное	Цифровое	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Дополнительные указания	Прочие элементы		Al
								каждый	сумма	
ABE	–	0,45–0,60	0,35–0,70	0,05	0,45–0,60	0,05	Ti + V + Mn + Cr: 0,015	0,03	0,10	остальное
–	6101	0,30–0,70	0,50	0,10	0,35–0,80	0,10	Ti + V + Ni + Ga + Mn + Cr: 0,10	0,03	0,10	остальное
–	6201	0,50–0,90	0,50	0,10	0,60–0,90	0,10	Ti + V + Ni + Ga + Mn + Cr: 0,10	0,03	0,10	остальное

*Таблица 9
Химический состав катанки из алюминиевых сплавов марок ABE, 6101 и 6201 по ТУ 16-705.493–2006*

Основные компоненты	Марка катанки		
	КАС ABE	КАС 6101	КАС 6201
	Химический состав, %		
Алюминий	основа	основа	основа
Кремний	0,45–0,60	0,30–0,70	0,50–0,90
Магний	0,45–0,60	0,35–0,80	0,60–0,90
Железо	0,35–0,70	не более 0,50	не более 0,50
Примеси, не более:			
• цинк	0,05	0,10	0,10
• медь	0,05	0,10	0,10
• бор	—	0,06	0,06
Прочие примеси, не более			
Каждый элемент отдельно	—	0,03	0,03
Сумма	Титан, ванадий, хром, марганец 0,015	Титан, ванадий, никель, галлий, хром, марганец 0,10	Титан, ванадий, никель, галлий, хром, марганец 0,10

Таблица 10

Механические свойства и удельное электрическое сопротивление катанки из алюминиевых сплавов марок АВЕ, 6101 и 6201 по ТУ 16-705.493–2006

Марка и тип катанки	Временное сопротивление, не менее, МПа	Относительное удлинение, не менее, %		Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м·10 ⁻⁶ , не более
		A ₂₀₀	A ₁₀₀	
КАС АВЕ – Т	132	12		0,0325
КАС АВЕ – Т1	170	12		0,0340
КАС АВЕ – Т4	160	12		0,0335
КАС 6101 – Т	130		17	0,0340
КАС 6101 – Т1	170	13	17	0,0350
КАС 6101 – Т4	150		23	0,0350
КАС 6201 – Т	140		17	0,0350
КАС 6201 – Т1	205		17	0,0360
КАС 6201 – Т4	160		21	0,0360

личение склонности к межкристаллитной коррозии в искусственно состаренном состоянии [4].

2.2. Требования к катанке системы Al–Si–Mg изложены в двух документах: ТУ 16-705.493–2006 «Катанка из алюминиевого сплава. Технические условия» и ГОСТ 20967–2019 «Катанка из алюминиевых сплавов. Технические условия». При этом в ТУ 16-705.493–2006 приведены требования к катанке из трёх марок сплавов: АВЕ, 6101 и 6201, а в ГОСТ 20967 – только к катанке из одного сплава этой системы – АВЕ.

Примечательно, что химические составы катанки АВЕ по ТУ 16-705.493–2006 и по ГОСТ 20967 практически не отличаются, а по механическим свойствам имеются лишь незначительные отличия, поэтому ограничимся выдержками из ТУ 16-705.493–2006, которые приведены в табл. 9 и 10.

Обозначения термообработки: Т – без закалки; Т1 – закалка на проход с последующим естественным старением; Т4 – закалка в бухтах с последующим естественным старением.

2.3. Требования к проволоке из высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg приведены в ТУ 16-705.494–2006 «Проволока круглая из алюминиевого сплава электротехническая».

По ТУ 16-705.494–2006 проволока из высокопрочных сплавов выпускается следующих марок:

АСТ – проволока из алюминиевого сплава, твердая;

АСМ – проволока из алюминиевого сплава, мягкая;

АС3-1 ÷ АС3-6 – проволока из алюминиевого сплава, термомеханически обработанная.

Механические и электрические свойства проволоки из сплавов системы Al–Si–Mg приведены в табл. 11.

Таблица 11

Механические и электрические свойства проволоки из сплавов системы Al–Si–Mg по ТУ 16-705.494–2006

Марка проволоки Al, %	Номинальный диаметр, мм	Временное сопротивление, не менее, МПа		Относительное удлинение, не менее, %	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м·10 ⁻⁶ , не более	
		отдельных проволок	среднее для партии		отдельных проволок	среднее для партии
АСМ	От 1,00 до 5,0	100	–	15	0,02950	–
АСТ	« 1,00 « 2,00	235	–	1,5	0,03000	–
	Св. 2,00 « 3,50 « 3,50 « 5,00	215 195	– –			
АС3-1	От 1,50 « 3,50	325	–	3,0	0,03284	–
	Св. 3,50 « 5,00	315	–			



Таблица 11 (продолжение)

Марка проволоки Al, %	Номинальный диаметр, мм	Временное сопротивление, не менее, МПа		Относительное удлинение, не менее, %	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м·10 ⁻⁶ , не более	
		отдельных проволок	среднее для партии		отдельных проволок	среднее для партии
АСЗ-2	От 1,50 « 5,00	295	–	4,0	0,03253	–
АСЗ-3	От 1,50 « 3,50	325	342	3,0	0,03290	0,03260
	Св. 3,50 « 5,00	315	330			
АСЗ-4	От 1,00 до 5,0	295	–	4,0	0,03220	0,03120
АСЗ-5	От 1,50 « 3,50	314	–	3,5	0,03150	0,03100
	Св. 3,50 « 5,00	304	–			
АСЗ-6	От 1,00 « 2,50	300	–	3,0	0,03050	0,03000
	Св. 2,50 « 3,00	290	–			
	« 3,00 « 3,50	275	–			
	« 3,50 « 4,00	265	–			
	« 4,00 « 5,00	255	–			

Примечание.

В ГОСТ 4784–2019 присутствует деформируемый сплав системы Al–Si–Mg марки 1350 (АД 35), который не применяется для изготовления проволоки и токопроводящих жил. Этот сплав используют для изготовления полуфабрикатов методом горячей или холодной деформации: профилей и труб на экструзионных прессах, для производства различных средненагруженных деталей, работающих в интервале температур от +50 до –70 °С, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость.

Также в ГОСТ 4784–2019 присутствует алюминий марки AW-1350, применявшийся ранее в электропроводке зданий и сооружений в Канаде, США и ряда других стран. Из-за схожести обозначений иногда путают алюминий марки AW-1350 и высокопрочный алюминиевый сплав марки 1350.

3. Сплавы на основе системы Al–Fe

В большинстве алюминиевых сплавов железо является наиболее опасной и вредной примесью. Связано это с фазами, которое оно образует с другими примесями, включая кремний и легирующие элементы. Дело в том, что железо, в отличие от других переходных металлов (Cr, Mn, Zr, Ti, Sc), является практически нерастворимым в алюминии элементом. Даже при очень больших скоростях охлаждения (свыше 1000 К/с) не образуется твёрдый раствор железа в алюминии. В результате этого в структуре алюминия появляется двухфазная область Al+Al₃Fe. Соединение Al₃Fe выделяется в виде игл, играющих роль надрезов, снижающих пластические свойства алюминия и его коррозионную стойкость [5, 6].

Однако железо в некоторых сплавах может выступать и как легирующий элемент. Среди них – сплавы, которые получают по специальным технологиям, например быстрым затвердеванием расплава и механическим легированием, или сплавы со специальными свойствами железосодержащих фаз [5].

Вплоть до 1970-х годов для внутренней проводки в зданиях и сооружениях применялись провода и кабели с жилами из холоднотянутого алюминия марки АД0Е по ГОСТ 4784 или марки А5Е первично-

го алюминия по ГОСТ 11069 (американский аналог – алюминий 1350). Однако провода из такого алюминия обладали повышенной ползучестью под нагрузкой. Это приводило к ослаблению контактов в розетках, выключателях и т.п., их перегреву, что часто являлось причиной пожаров. Кроме того, в таких проводах применяли проволоку в нагартованном состоянии. Такое состояние характеризуется небольшим относительным удлинением (1,5–2 %) и малым числом перегибов. Это приводило к частым переломам проводов на стадии монтажных работ, когда несколько раз приходилось изгибать, перекладывать, откручивать и заново закручивать контакты. Поэтому, начиная с 2003 года, применение алюминиевой проводки в зданиях было ограничено (ПУЭ-7, редакция 2002 года, СП 31-110–2003, раздел 14.3).

Поиски решения этой проблемы привели к тому, что в 1970-х годах в США и в Канаде были разработаны сплавы с повышенным содержанием железа, обладающие низкой ползучестью под нагрузкой и повышенной пластичностью. Эти сплавы, так называемой 8000-й серии, вошли в американский стандарт ASTM B800, в котором, начиная с 1988 года, установлены требования к алюминиевым сплавам системы Al–Fe. Из этих сплавов стало возможным изготавливать круглую

проволоку для электрических кабелей и однопроводных проводов для внутренней проводки зданий и сооружений

В свою очередь, компания «РУСАЛ» совместно с рядом научно-исследовательских организаций разработала технологию получения целой группы отечественных сплавов системы Al–Fe. Из этой группы, состоящей из полутора десятков сплавов, в качестве проводников для изготовления проводов и кабелей для внутренней проводки нашли применение лишь две марки сплавов: 8030 и 8176 [7].

Разрешение о применении сплавов марок 8030 и 8176 в токопроводящих жилах кабелей для внутренней проводки оформлено Приказом Минэнерго № 968 от 16.10.2017 г., Изменениями № 2 и № 3 к Своду правил СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий», Изменением № 1 ГОСТ 31996–2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия».

3.1. Химический состав сплавов марок 8030 и 8176 указан в ГОСТ 4784–2019. В этом стандарте отдельным примечанием оговаривается химический состав сплавов, предназначенных непосредственно для изготовления проволоки электротехнического назначения. Выдержка из ГОСТ 4784 приведена в табл. 12.

Добавка железа в сплавах 8000-й серии обеспечивает высокую прочность в отожжённом состоянии и уменьшает ползучесть под нагрузкой. Добавка меди в сплаве 8030 способствует сохранению прочностных свойств при высокой температуре.

3.2. Требования к катанке из сплавов марок 8030 и 8176 приведены в двух стандартах: в межгосударственном стандарте ГОСТ 20967–2019 «Катанка из алюминиевых сплавов. Технические условия» и в национальном стандарте ГОСТ Р 58019–2017 «Катанка из алюминиевых сплавов марок 8176 и 8030. Технические условия».

Наличие двух действующих стандартов на катанку из сплавов марок 8030 и 8176 создаёт некоторую неопределённость в их применении, так как оба этих стандарта распространяются на один и тот же объект – катанку из алюминиевых сплавов, предназначенную для изготовления проволоки электротехнического назначения. Причём, требования к некоторым характеристикам катанки различаются. Выяснить приоритет в применении того или иного стандарта на территории РФ не удалось.

Ниже приведены выдержки из двух вышеуказанных стандартов.

Химический состав катанки из сплавов марок 8030 и 8176 по ГОСТ 20967–2019 приведен в табл. 13. Предположительно, указано максимальное содержание элементов, если не указаны пределы. Однако в самом стандарте об этом ничего не сообщается.

Химический состав катанки из сплавов марок 8030 и 8176 по национальному стандарту ГОСТ Р 58019–2017 приведён в табл. 14.

Сопоставление табл. 13 и 14 показывает, что имеются различия у вышеуказанных стандартов в требованиях по содержанию железа, меди, кремния, магния и галлия в катанке из сплавов марок 8030 и 8176.

Примечательно, что российские сплавы марок 8030 и 8176, предназначенные для изготовления

Таблица 12

Химический состав сплавов марок 8030 и 8176 по ГОСТ 4784–2019 для изготовления проволоки электротехнического назначения (содержание элементов – максимальное, если не указаны пределы)

Обозначение марки (цифровое)	Массовая доля элемента, %									
	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ga	Сумма Ti + V + Mn + Cr	Прочие элементы		Al
								каждый	сумма	
8030	0,07	0,35–0,45	0,15–0,19	0,02	0,04	0,01	0,015	0,03	0,10	остальное
8176	0,07	0,40–0,50	0,01	0,02	0,04	0,01	0,015	0,03	0,15	остальное

Таблица 13

Химический состав катанки из сплавов марок 8030 и 8176 по ГОСТ 20967–2019

Марка катанки	Массовая доля элемента, %										
	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ga	В	Сумма Ti + V + Mn + Cr	Прочие элементы		Al
									каждый	сумма	
8030	0,10	0,30–0,8	0,15–0,30	0,03	0,03	0,03	0,001–0,04	0,001–0,04	0,015	0,03	основа
8176	0,03–0,15	0,40–1,0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,015	0,03	основа



Таблица 14

Химический состав катанки из сплавов марок 8030 и 8176 по ГОСТ Р 58019–2017

Марка катанки	Массовая доля, %										
	Al	Основных элементов		Примесей, не более						Прочих элементов, не более	
		Fe	Cu	Si	Mg	Cu	Zn	Ga	Сумма Ti + V + Cr + Mn	каждого	всего
8176	основа	0,40–0,50	—	0,07	0,02	0,01	0,04	0,01	0,015	0,03	0,15
8030	основа	0,35–0,45	0,15–0,19	0,07	0,02	—	0,04	0,01	0,015	0,03	0,10

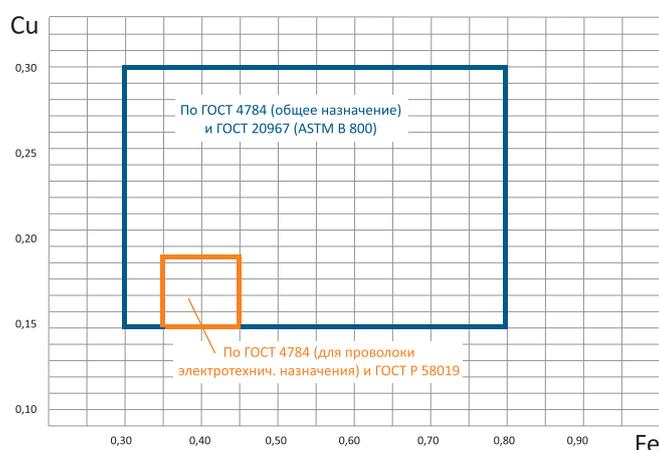


Рис. 1. Пределы содержания железа и меди в сплаве марки 8030 по ГОСТ 4784–2019, ГОСТ 20967–2019 (ASTM B 800) и ГОСТ Р 58019–2017

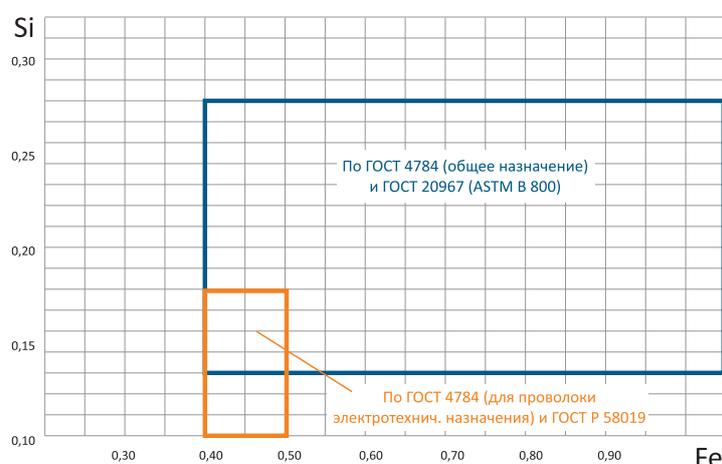


Рис. 2. Пределы содержания железа и кремния в сплаве марки 8176 по ГОСТ 4784–2019, ГОСТ 20967–2019 (ASTM B 800) и ГОСТ Р 58019–2017

проволоки электротехнического назначения и выпускаемые по ГОСТ 4784 и ГОСТ Р 58019, существенно отличаются по своему химическому составу от сплавов по ГОСТ 20967 и американского стандарта ASTM B 800, а именно: сплавы по ГОСТ 4784 и ГОСТ Р 58019 имеют значительно более низкое содержание легирующих элементов – железа, меди и кремния, чем по ГОСТ 20967 и стандарту ASTM B 800. Это проиллюстрировано рис. 1 и 2, на которых показаны пределы содержания основных легирующих элементов в сплаве 8030 (железо и медь) и 8176 (железо и кремний) по разным стандартам. Не исключена вероятность того, что, при составлении ГОСТ 20967–2019 было упущено уточнение химического состава сплавов марок 8030 и 8176, предназначенных для изготовления проволоки электротехнического назначения, но содержащееся в основополагающем ГОСТ 4784–2019.

Отметим, что межгосударственный стандарт ГОСТ 20967–2019 практически идентичен по содержанию элементов в катанке стандарту

ASTM B 800-05(2021) «Standard Specification for 8000 Series Aluminum Alloy Wire for Electrical Purposes – Annealed and Intermediate Tempers».

Различие в стандартах на катанку 8030 и 8176 состоит ещё и в том, что по ГОСТ 20967 катанку изготавливают шести номинальных диаметров: от 9,0 до 15,0 мм, в то время как по ГОСТ Р 58019 с учётом Изменения № 1, – только двух номинальных диаметров: 9,0 и 9,5 мм.

Механические свойства и удельное электросопротивление катанки 8030 и 8176 приведены в табл. 15. В табл. 15 сведены показатели по двум стандартам: ГОСТ 20967 и ГОСТ Р 58019. Практически все показатели по свойствам катанки в этих двух стандартах имеют одинаковые значения. Исключение составляет лишь временное сопротивление у нетермообработанной катанки: по ГОСТ Р 58019 (указано в скобках) оно находится в более узком диапазоне, чем в ГОСТ 20967. Это связано с более узким диапазоном номинальных диаметров катанки по национальному стандарту.

Таблица 15

Механические свойства и удельное электросопротивление катанки 8030 и 8176 (выдержки из ГОСТ 20967–2019 и ГОСТ Р 58019–2017)

Марка катанки	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, не менее, %	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м·10 ⁻⁶ , не более
8030	100–150 (115–140)	12	0,0287
8030-О	60–110	32	0,0286
8176	100–150 (115–140)	12	0,0287
8176-О	60–110	32	0,0286

Примечания.

1. В скобках указано временное сопротивление катанки по ГОСТ Р 58019–2017.
2. Буква «О» означает, что катанка находится в термообработанном состоянии (после отжига).

Катанка из сплавов марок 8030 и 8176 должна выдерживать технологическую пробу волочением. Это требование присутствует в двух вышеуказанных стандартах. При этом не должно быть более одного обрыва на две тонны катанки по дефектам металлургического характера (шлаковые, оксидные включения, раковины).

3.3. Нормативную документацию на проволоку из сплавов марок 8030 и 8176 не удалось обнаружить.

Тем не менее, для однопроволочных токопроводящих жил (а по сути это и есть проволока) некоторые требования установлены Приказом Минэнерго № 968 от 16.10.2017 г.

Установленные этим Приказом требования к химическому составу ТПЖ повторяют требования ГОСТ Р 58019–2017 к катанке из сплавов марок 8030 и 8176.

Требования к механическим характеристикам ТПЖ в Приказе Минэнерго № 968 от 16.10.2017 г. установлены в достаточно широких диапазонах. Они представлены в табл. 16.

При изготовлении ТПЖ из сплавов марок 8030 и 8176 применяют специальные режимы волочения и термообработки, что позволяет добиться заданных физико-механических свойств жил кабелей и проводов. Эти технологические режимы составляют основу НОУ-ХАУ предприятия-изготовителя [7].

4. Термостойкие алюминиевые сплавы системы Al–Zr

Основная особенность алюминий-циркониевых сплавов, в отличие от алюминия и остальных сплавов, заключается в их способности долговременно работать при температурах до 150–230 °С. Повышение рабочей температуры по сравнению с алюминием достигается тем, что при легировании алюминия цирконием (0,1–0,4 масс. %) в конечной структуре сплава

Таблица 16

Требования к механическим характеристикам ТПЖ из алюминиевых сплавов марок 8030 и 8176 (согласно Приказу Минэнерго № 968 от 16.10.2017 г.)

Показатель	Значение
Сечение, мм ² (диаметр, мм)	1,5; 2,5; 4,0 (1,38; 1,78; 2,26)
Число перегибов, не менее	15
Временное сопротивление, МПа	75–130
Относительное удлинение после разрыва, %	5–20
Электросопротивление	по ГОСТ 22483

формируются наночастицы фазы Al₃Zr (L12), которые значительно повышают температуру рекристаллизации [8]. Это приводит к повышению температуры разупрочняющего отжига, что позволяет работать сплавам при температурах до 230 °С.

Применяются алюминий-циркониевые сплавы, главным образом, в проводах для воздушных линий электропередачи. За счёт повышения рабочей температуры проводов имеется возможность с минимальными затратами повысить пропускную способность воздушных линий электропередачи в 1,5–2 раза по сравнению с линиями, в которых используются провода с алюминием такого же сечения [9].

4.1. Требования к отечественной катанке из термостойких сплавов приведены в ГОСТ 20967–2019 «Катанка из алюминиевых сплавов. Технические условия» и ТУ 171213-001-05785253-12 «Катанка марки АЦЕ-25 из сплава системы Al–Zr», разработанных компанией «РУСАЛ».

Химический состав термостойкой катанки приведён в табл. 17.



Таблица 17
Химический состав алюминий-циркониевой катанки

Марка катанки	Содержание элементов, % масс.											
	Al	Zr	Fe	Не более						Прочие, не более		
				Si	Mg	Cu	Zn	B	Сумма Ti + V + Cr + Mn	Ga	каждой	всего
АЦЕ ¹	Основа	0,20–0,45	0,15–0,30	0,08	0,02	0,01	0,02	0,005	0,015	0,03	0,03	0,15
АЦЕ-25 ²		0,20–0,35						0,003				

Примечания. ¹ По ГОСТ 20967–2019;

² По ТУ 171213-001-05785253-12.

Таблица 18
Физико-механические свойства алюминий-циркониевой катанки

Марка катанки	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м 10 ⁻⁶ , не более	Временное сопротивление, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее
АЦЕ ¹	0,0350	130–200	8
АЦЕ-О ¹	0,0285	120–160	12
АЦЕ-25 ²	0,0285	120	8

Примечания. ¹ По ГОСТ 20967–2019;

² По ТУ 171213-001-05785253-12.

Катанка марки АЦЕ-25 изготавливается номинальным диаметром 9,5 мм и подвергается отжигу. Катанка марки АЦЕ изготавливается диаметром от 9,0 до 15,0 мм и производится как в отожженном, так и в неотожженном состояниях.

Сведения о непрерывно действующих максимально допустимых температурах в вышеуказанных нормативных документах не приводятся.

Удельное электросопротивление и основные механические свойства алюминий-циркониевой катанки приведены в табл. 18. Буква «О» обозначает отожженное состояние.

Алюминий-циркониевая катанка должна выдерживать технологическую пробу волочением. При этом не должно быть более одного обрыва на две тонны катанки по дефектам металлургического характера.

4.2. На проволоку из термостойких сплавов существует ГОСТ Р МЭК 62004–2014 «Проволока из термостойкого алюминиевого сплава для провода воздушной линии электропередачи».

По этому стандарту проволоку изготавливают четырёх типов: АТ1 и АТ2 – с непрерывно действующей максимально допустимой температурой 150 °С, АТ3 – с температурой 210 °С и АТ4 – с температурой 230 °С. При этом проволоку типа АТ2 изготавливают из сверхпрочного термостойкого сплава.

Химический состав сплавов, из которых изготавливают проволоку, в вышеприведённом стан-

дарте указан очень «демократично»: «Проволока должна быть изготовлена из алюминиево-циркониевого сплава и иметь такой состав, который соответствовал бы механическим, электрическим свойствам и термостойкости проволоки типов АТ1, АТ2, АТ3 и АТ4».

Физико-механические свойства проволок из термостойких сплавов приведены в табл. 19.

К специфическим требованиям стандарта ГОСТ Р МЭК 62004 к термостойкой проволоке относятся проверка на термостойкость и испытание на навивание. Методы таких испытаний, как и других упомянутых, но не описанных в данной статье, подробно изложены в соответствующих нормативных документах и технической литературе.

Отличительные свойства проволоки из рассмотренных выше групп алюминиевых сплавов приведены в табл. 20. Наиболее характерные параметры выделены полужирным шрифтом.

Основные виды кабельных изделий, в которых используются алюминиевые сплавы, приведены в [10]. Несомненно, этот перечень, как и перечень возможных для применения сплавов, не носит исчерпывающий характер.

Например, в [11] сообщается об успешном применении алюминий-циркониевого сплава марки ТАС с добавками редкоземельных металлов (скандий, иттрий, церий, ванадий, гафний и др.) в нефтепогружных кабелях. Ведутся разработки новых технологий

Таблица 19

Физико-механические свойства проволок из термостойких сплавов по ГОСТ Р МЭК 62004–2014

Тип	Номинальный диаметр, мм		Временное сопротивление, не менее, МПа	Относительное удлинение, не менее, %	Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·м·10 ⁻⁶ , не более	Непрерывно действующая максимально допустимая температура, °С
	свыше	до, включительно				
АТ1	-	2,60 ^а	169	1,5	0,028735	150
	2,60	2,90	166	1,6		
	2,90	3,50	162	1,7		
	3,50	3,80		1,8		
	3,80	4,00	159	1,9		
	4,00	4,50 ^а		2,0		
АТ2	-	2,60 ^а	248	1,5	0,031347	150
	2,60	2,90	245	1,6		
	2,90	3,50	241	1,7		
	3,50	3,80		1,8		
	3,80	4,00	238	1,9		
	4,00	4,50 ^а		225		
АТ3	-	2,30 ^а	176	1,5	0,028735	210
	2,30	2,60	169			
	2,60	2,90	166	1,6		
	2,90	3,50	162	1,7		
	3,50	3,80		1,8		
	3,80	4,00	159	1,9		
4,00	4,50 [*]	2,0				
АТ4	-	2,60 [*]	169	1,5	0,029726	230
	2,60	2,90	165	1,6		
	2,90	3,50	162	1,7		
	3,50	3,80		1,8		
	3,80	4,00	159	1,9		
	4,00	4,50 [*]		2,0		

**Для номинальных диаметров менее 2,60 мм и более 4,50 мм требования должны быть согласованы между изготовителем и потребителем.*

для получения алюминиевых сплавов с уникальными свойствами и структурой, например, методом электромагнитной гидродинамики [12], и т.д.

Таким образом, наша отечественная металлургия освоила и выпускает для кабельной промышленности достаточно широкую номенклатуру алюминиевых сплавов, не уступающих по свойствам своим зарубежным аналогам. И новые разработки, возможно, скоро заявят о себе.

Список источников

1. Цимек Г. Применение биметаллической проволоки медь-алюминий // Кабели и провода. – 2010. – № 4 (323). – С. 12–15.
2. Алюминий и его сплавы / Сост. А.Р. Луц, А.А. Суслина: учеб. пособие. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с.

3. Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов: научное издание. – М.: МИСиС, 2019. – 392 с.

ISBN 978-5-87623-213-7.

URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785876232137> (дата обращения: 03.10.2022).

4. Ковригин Л.А. Закалка катанки из алюминиевого сплава АВЕ // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 3. – С. 33–37.

5. Belov N.A., Aksenov A.A., Eskin D.G. Iron in aluminum alloys: impurity and alloying element. – Fransis and Tailor, 2002 – 343 p.

6. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. пособие для ВУЗов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.



Таблица 20

Основные характеристики проволок из алюминия и алюминиевых сплавов

Материал проволок	Основные легирующие элементы	Марка	Максимально допустимая рабочая температура, °С	Временное сопротивление, МПа, не менее если не указан диапазон	Удельное электросопротивление при 20 °С, не более, $\times 10^{-6}$ Ом·м
Алюминий (Al)	–	АМ АПТ АТ	90	60–90 90–140 150–190	0,0280–0,0283
Высокопрочные сплавы системы Al–Si–Mg	Fe, Si, Mg: по 0,3–0,5 %	АВЕ 6101 6201	90	280 300 330	0,0295–0,0329
Термостойкие сплавы системы Al–Zr	Zr: 0,1–0,3 %	АТ1 АТ2 АТ3 АТ4	150 150 210 230	160 240 160 160	0,0287–0,0313
Сплавы системы Al–Fe – низкая ползучесть	Fe: 0,35–0,50 %	8030 8176	90	75–130	по ГОСТ 22483

7. Каменский М.К., Недайхлиб Т.А., Фрик А.А. Кабели силовые с токопроводящими жилами из сплавов алюминия для электропроводок в жилых зданиях // Кабели и провода. – 2018. – № 3 (371). – С. 3–8.

8. Прохоров А.Ю. Исследование и разработка технологии плавки и литья термостойкого алюминиевого сплава с добавкой циркония с целью получения слитков для электротехнического применения: автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 2011. – 25 с.

9. Лопарев В.В., Образцов Ю.В. Об особенностях современных неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи // Кабели и провода. – 2014. – № 6 (349) – С. 9–15.

10. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода – 2012. – № 1 (332). – С. 8–15.

11. Шушаков А.А., Галеев А.Ф., Катрич Н.М., Сарпулов Н.П., Сулейманов А.Г., Сашин И.А. Результаты опытно-промышленных испытаний погружных кабельных линий из термокоррозионностойкого алюминиевого сплава ТАС в ООО «Газпромнефть-Хантос» // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 76–78.

12. Тимофеев В.Н., Маракушин Н.П., Хацаюк М.Ю., Темеров А.С., Гудков И.С. Исследование, разработка и внедрение МГД-технологий в плавильно-литейное производство алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 106–110.

List of References

1. Tsimek G. Use of copper-aluminium bimetal wire // Cables and Wires. – 2010. – No 4 (323). – P. 12–15.

2. Aluminium and its alloys / Content by A.R. Luts, A.A. Suslina: Study guide – Samars: Samara State Technical University, 2013. – 81 p.

3. Belov N.A. Phase composition of aluminium alloys: scientific publication. – М.: МИСиС, 2019. – 392 p. ISBN 978-5-87623-213-7

URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785876232137> (access date: 03.10.2022).

4. Kovrigin L.A. Quenching of ABE aluminium alloy rod. // Bulletin of the Perm State Technical University. – Electrical engineering, information technologies, control systems. – 2009. – No 3. – P. 33–37.

5. Belov N.A., Aksenov A.A., Eskin D.G. Iron in aluminum alloys: impurity and alloying element. – Fransi and Taylor, 2002 – 343 p.

6. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. General metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys. Study guide for higher education establishments. 2-nd revised and amended edition. – М.: Metallurgy, 1981. – 416 p.

7. Kamensky M.K., Nedaikhlib T.A., Frik A.A. Power cables with aluminium alloy conductors for electrical wiring in residential buildings // Cables and Wires. – 2018. – No 3 (371). – P. 3–8.

8. Prokhorov A.Yu. Investigation and development of smelting and casting technology for a heat-resistant aluminium alloy with zirconium additive aimed at obtaining ingots for electrical applications: Abstract of Ph.D thesis. – М.: МИСиС, 2011. – 25 p.

9. Loparev V.V., Obratsov Yu.V. On specific features of modern bare conductors for overhead power transmission lines // Cables and Wires. – 2014. – No 6 (349) – P. 9–15.

10. Bely D.I. Aluminium alloys for current-carrying conductors of cable products // Cables and Wires. – 2012. – No 1 (332). – P. 8–15.

11. Sushakov A.A., Galeev A.F., Katrich N.M., Sarapulov N.P., Suleimanov A.G., Sashin I.A. The results of field trials of submersible cable lines made of TAC heat- and corrosion-resistant aluminium alloy in Ltd. “Gazprom Neft-Khantos” // Oil facilities. – 2015. – No 12. – P. 76–78.

12. Timofeev V.N., Markushin N.P., Khazayuk M.Yu., Temerov A.S., Gudkov I.S. Investigation, development and introduction of MHD technologies in smelting and casting production of aluminium alloys // Current problems of energy-saving technologies APEET-2014: Collection of scientific papers. – Yekaterinburg: UrFu, 2014. – P. 106–110.