

УДК 621.777

**Development of New Devices and Methods  
of Combined Processing  
for Obtaining Electrotechnical Wire Rod  
from Aluminium Alloys Al-Zr System**

**Sergey B. Sidelnikov,  
Nikolay N. Dovzhenko, Vadim M. Bespalov\*,  
Denis S. Voroshilov, Tatiana N. Drosdova,  
Anton P. Samchuk and Ruslan E. Sokolov**  
*Siberian Federal University  
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 12.02.2015, received in revised form 26.04.2015, accepted 13.05.2015

---

*This article represents research results of mechanical and electrical properties, and also microstructure of deformed semi-finished products from low alloyed alloys system Al-Zr, obtained using methods of combined rolling-extruding, combined casting and rolling-extruding with intensive plastic deformation.*

*Keywords: combined processing, rolling, extruding, electrical resistivity, mechanical properties, microstructure, aluminium, zirconium, wire, rolled wire.*

*DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-626-635.*

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: vmbespalov@mail.ru

## **Разработка новых устройств и способов совмещенной обработки для получения электротехнической катанки из алюминиевых сплавов системы Al-Zr**

**С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко,  
В.М. Беспалов, Д.С. Ворошилов,  
Т.Н. Дроздова, А.П. Самчук, Р.Е. Соколов**  
*Сибирский федеральный университет  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

*В статье представлены результаты исследований механических и электрических свойств, а также микроструктуры деформированных полуфабрикатов из низколегированных сплавов системы Al-Zr, полученных с помощью методов совмещенной прокатки-прессования, совмещенного литья и прокатки-прессования и интенсивной пластической деформации.*

*Ключевые слова: совмещенные процессы, прокатка, прессование, электросопротивление, механические свойства, микроструктура, алюминий, цирконий, проволока, катанка.*

Большая потребность в алюминиевой кабельно-проводниковой продукции и достаточно высокий современный уровень технических требований, предъявляемых к ней, обуславливают необходимость проведения поисковых исследований, направленных на создание новых сплавов, устройств и способов изготовления электропроводников различной конфигурации, обеспечивающих достижение высоких эксплуатационных свойств последних.

Для их производства как в России, так и за рубежом наиболее подходят сплавы системы Al-Zr, обладающие повышенной термостойкостью и прочностью. Современный рынок кабельно-проводниковой продукции характеризуется наличием проволочных полуфабрикатов многих зарубежных фирм, среди которых Alstom, Nexans (Франция), Siemens (Германия), Prysmian (Италия), NPA Skawina S.A. (Польша), J-Power Systems (Япония), Lumpi-Berndorf (Австрия), Southwire, General Cable, 3M (США) и мн. др. Все они занимают весомую долю на отечественном рынке и в целом создают огромную конкуренцию российским кабельным заводам. В России выпуск продукции в виде катанки из сплавов системы Al-Zr осуществляется на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) и существенно ограничен ввиду устаревшей промышленной базы отечественных предприятий. Прежде всего это связано с недостаточной прочностью прокатных станов для производства катанки из электротехнических сплавов алюминия, поэтому отечественные заводы вынуждены проводить модернизацию производственных мощностей путем замены существующего оборудования, причем преимущественно на импортное. В этой связи актуальной задачей становится поиск и проектирование принципиально новых энергосберегающих технологий и оборудования для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения в виде катанки, прутков, проволоки и профилей.

Целью данной работы является создание комплекса технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности производства длинномерных деформи-

рованных полуфабрикатов электротехнического назначения из сплавов системы Al-Zr на основе применения процессов совмещенной обработки металла. Ее актуальность подтверждается тем, что она выполнялась в рамках постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» в соответствии с договором Министерства образования и науки России № 13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки», а также по договорам с ООО «РУСАЛ ИТЦ».

Для выполнения поставленной цели были разработаны новые технические решения в виде устройств для совмещенной обработки металла (рис. 1, 2), защищенные патентами РФ. Они позволили повысить эффективность использования прессового инструмента, снизить энергетические затраты, повысить производительность и выход годного металла.

На базе этих технических решений создана лабораторная установка непрерывного литья, прокатки и прессования СЛиПП-2,5, которая показана на рис. 3, а ее технические характеристики приведены в табл. 1.

Линия совмещенной обработки на базе этой установки включает в себя наклоняемую индукционную печь-миксер, деформирующий узел, ванну для охлаждения, калибровочную машину и моталку. Печь-миксер выполнена с регулятором подачи расплава и имеет общую емкость тигля по алюминию 350 кг. Деформирующий узел состоит из наклонной станины, в которой расположены валки, образующие закрытый ящичный калибр, перекрытый на выходе матрицей с помощью гидроцилиндра, и устройства для поджима валков гидравлического типа.

С использованием установок совмещенной обработки СЛиПП-2,5 и СПП-200 (табл. 1) были проведены экспериментальные исследования по получению прутков и проволоки из

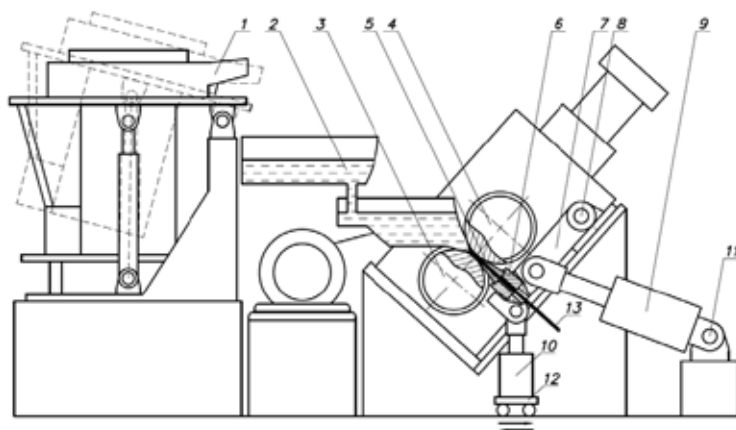


Рис. 1. Общий вид устройства для совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛиПП) по патенту РФ № 128529: 1 – печь-миксер; 2 – литниковая система; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – матрица; 6 – матрицедержатель; 7 – кронштейн; 8, 11, 12 – шарниры; 9 – гидроцилиндр; 10 – вертикальный гидроцилиндр

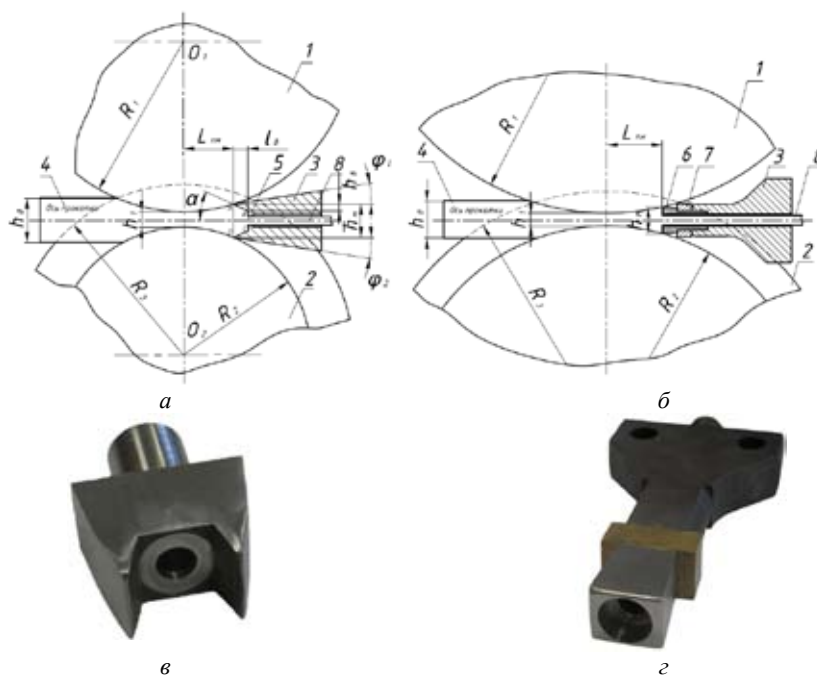


Рис. 2. Устройства для совмещенной прокатки и прессования (СПП) по патенту РФ № 138590 (а) и РФ № 139085 (б) и вид матричного инструмента (в, г): 1 – валок с выступом; 2 – валок с канавкой; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – трапецидальная выемка; 6 – калибрующая вставка; 7 – антифрикционная вставка; 8 – изделие



Рис. 3. Экспериментальная установка СЛиПП-2,5

сплавов системы Al-Zr. Для этого в лабораторных условиях ИЦМиМ были разработаны новые алюминиевые сплавы с добавками циркония в пределах 0,15 – 0,50 мас. % и получены слитки с различным химическим составом.

Низколегированные алюминиевые сплавы с добавками циркония в пределах 0,15 – 0,50 % выплавляли в высокочастотной плавильной установке. Основным легирующим элементом в сплавах являлся цирконий, а железо и магний вводили дополнительно для повышения прочностных свойств. Для приготовления сплавов использовали цирконий в виде брикетов (80 %

Таблица 1. Технические характеристики установок совмещенной обработки

Параметры	СПП-200	СЛиПП-2,5
Начальный диаметр валка, мм	200	480
Длина бочки валка, мм	240	250
Диаметр шейки вала, мм	100	150
Размеры ящичного калибра в наименьшем сечении, мм	7×15	10×22, 20×42
Количество оборотов валка, об/мин	4, 8, 14	1-15
Передаточное число редуктора, ед.	40	40
Мощность электродвигателя, кВт	20	45
Момент на выходном валу, кН× м	10	20
Рабочее давление гидростанции, кгс/см <sup>2</sup>	200-500	200
Максимальное усилие прижима, кН	300	300

Zr, остальное – флюс) фирмы Hoesch metallurgies GMBH (Германия). Предварительно просушенную лигатуру Al-Zr расчетного состава и массы вводили под зеркало расплава, предварительно нагретого до температуры 740-900 °С [1]. Расплав тщательно перемешивали от 1 до 3 мин, после этого подвергали выдержке в печи в интервале 5-20 мин и разливали в подогретые изложницы.

Некоторые прутки, полученные методом СЛиПП, подвергали обработке методом равноканального углового прессования (РКУП) на опытно-экспериментальной установке в Институте физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета [2]. Также проводили исследование опытных образцов катанки, полученной непрерывным способом литья-прокатки в промышленных условиях Иркутского алюминиевого завода (ОАО «ИркАЗ») [3].

В соответствии с технологией СПП заготовки размерами 14x14x250 мм нагревали до температуры 550 °С и задавали в калибр валков, вращающихся со скоростью 4 об/мин. При проведении процесса способом СЛИПП полученный расплав подавали в калибр валков через специальное заливное устройство. В обоих случаях получали на выходе прутки диаметром 9 мм. Метод РКУП проводили после термообработки с четырьмя циклами повторения при комнатной температуре. Опытные партии заводской катанки производили по серийной технологии ОАО «ИркАЗ» в соответствии с ТИ 445.02.02 и ВПУ 445.02.02.03 на литейно-прокатном агрегате. Расплав готовили в печи-миксере объемом до 20 т, после чего по заранее подогретой литниковой системе металл подавали на колесо кристаллизатора и далее на прокатный стан, включающий 14 клетей. Температура расплава в миксере и перед фильтром кристаллизатора составляла 740-750 и 710-720 °С соответственно, а прутка диаметром 9,5 мм на выходе из прокатного стана – 310-320 °С.

В работе исследовали влияние состава сплавов, технологии изготовления и интенсивных пластических деформаций на физико-механические свойства и структуру деформированных полуфабрикатов.

Механические характеристики полученных образцов испытывали на машине Walter Bai AG LFM 400 и LFM 20 с усилием 400 и 20 кН в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84.

Электросопротивление образцов  $\rho$  измеряли с помощью милливольтметра «Виток» в соответствии с ГОСТ 7229-76. Результаты исследования механических свойств и удельного электросопротивления исследуемых образцов, полученных разными способами совмещенной обработки, представлены на рис. 4–6 и в табл. 2, 3.

По мере повышения циркония в сплаве с 0,15 до 0,50 % прочность прутков возрастает (рис. 4) в среднем на 4-5 %, но одновременно происходит снижение электропроводности, что не совсем согласуется с требованиями по эксплуатационным характеристикам. Однако на примере алюминиевых сплавов с содержанием Zr 0,15-0,30 % возможно достижение значительного снижения удельного электросопротивления применением специальной термической обработки. В частности, термообработка прутка, полученного методом СПП из сплава Al-0,30 %Zr-0,20 %Fe, проведенная по режимам термической обработки, привела к снижению электросопротивления с 0,0326 до 0,0281 Ом·мм<sup>2</sup>/м, что удовлетворяет требованиям зарубежных и международных стандартов ASTM B941 и IEC 62004.

Анализ механических характеристик исследуемых образцов показал, что диапазон изменения временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  составляет 110-200 МПа в зависимости от метода

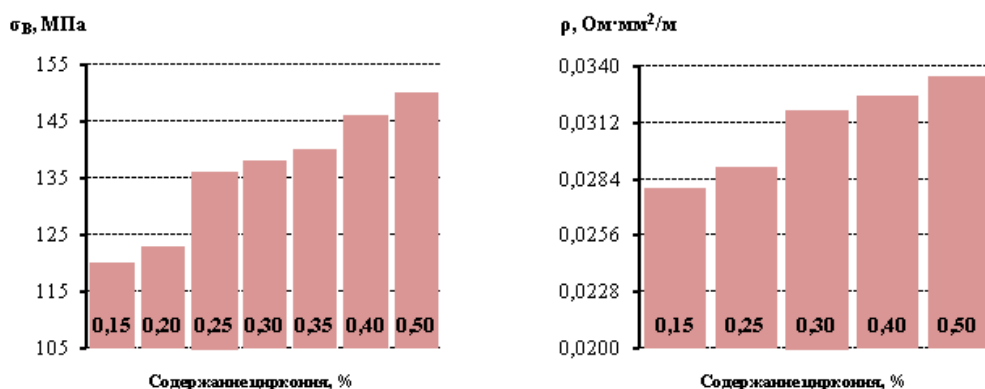


Рис. 4. Изменение временного сопротивления разрыву и удельного электросопротивления прутков с различным содержанием циркония, изготовленных методом СПП

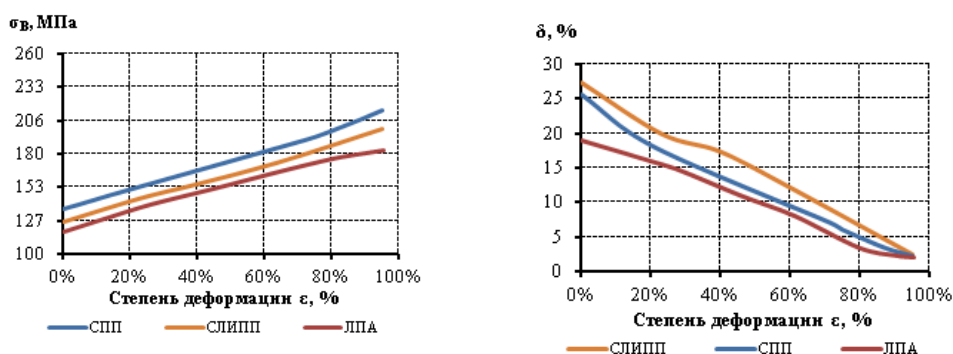


Рис. 5. Сравнение механических характеристик деформированных полуфабрикатов, полученных разными способами обработки из сплава Al-0,28 %Zr-0,26 %Fe

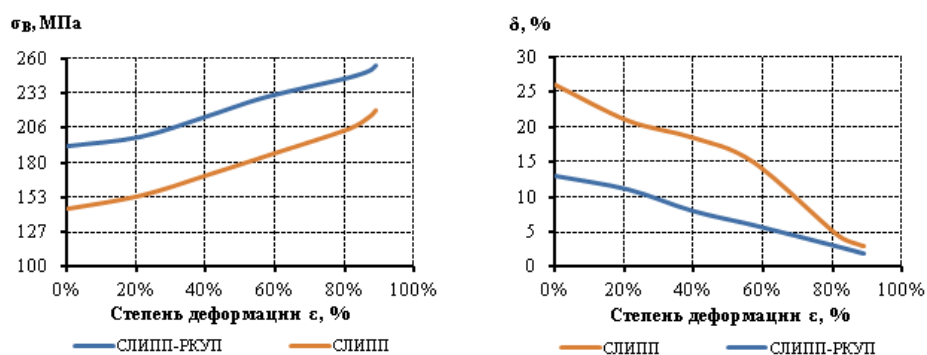


Рис. 6. Влияние ИПД на механические свойства деформированных полуфабрикатов из сплава Al-0,20 %Zr-0,30 %Mg

Таблица 2. Значения механических свойств и удельного электросопротивления деформированных полуфабрикатов из сплава Al-0,15 %Zr-0,20 %Fe, полученных разными способами обработки

Способ	Полуфабрикат, размеры	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
ЛПА	Катанка, диаметр 9,5 мм	110 – 120	18,71	0,0305 – 0,0309
	Проволока, диаметр 2 мм	190 – 200	1,55	0,0310 – 0,0320
СПП	Прутки, диаметр 9 мм	120 – 140	17,0	0,0291 – 0,0309
	Проволока, диаметр 2 мм	210 – 220	2,5	0,0296 – 0,0311
СЛиПП	Прутки, диаметр 9 мм	110 – 120	24	0,0284 – 0,0298
	Проволока, диаметр 2 мм	190 – 200	3,65	0,0285 – 0,0307

Таблица 3. Значения механических свойств и удельного электросопротивления деформированных полуфабрикатов из сплава Al-0,20 %Zr-0,30 %Mg, полученных разными способами обработки

Способ	Полуфабрикат, размеры	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
СЛиПП	Прутки, диаметр 9 мм	140 – 150	25,9	0,0330 – 0,0334
	Проволока, диаметр 2 мм	240 – 250	2,6	0,0340 – 0,0349
СЛиПП – ТО – 4 цикла РКУП	Пруток, диаметр 9 мм	190 – 200	12,9	0,0290 – 0,0294
	Проволока, диаметр 3 мм	250 – 260	2,0	0,0293 – 0,0297

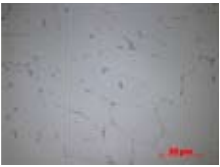







обработки. При этом значения  $\sigma_b$  прутков, полученных способом СПП, выше в среднем на 7 и 13 % по сравнению с прутками и катанкой, полученных методом СЛиПП и на ЛПА (рис. 5). Более значительное упрочнение прутков было достигнуто за счет применения метода РКУП с использованием интенсивной пластической деформации (ИПД). Временное сопротивление разрыву прутка из сплава Al-0,20 %Zr-0,30 %Mg, полученного способом СЛиПП, составило 145 МПа, а дальнейшая его обработка методом РКУП привела к повышению прочности на 33 % (рис. 6).

Микроструктурный анализ исследуемых образцов проводили на микроскопе Axio ObserverA1m, Carl Zeiss. Для этого изготавливали микрошлифы по методикам ООО «Митэ-ла» на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520 (Германия) и расходных материалах фирмы Lam Plan (Франция). Микроструктура образцов представлена в табл. 4.

Во всех исследуемых слитках структура состоит из  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия и включений избыточных фаз с Fe и Si. По результатам микроскопического анализа в сплавах, в которых температура заливки превышала 800 °С, не обнаружены частицы  $Al_3Zr$ , что свидетельствует о полном растворении циркония в алюминиевом твердом растворе. В структуре слитков сплавов Al-0,20 %Zr-0,20 %Fe и Al-0,23 %Zr-0,28 %Fe были обнаружены включения  $Al_3Zr$  в виде тонких разветвленных кристаллов, что может быть результатом снижения температуры заливки до 710-790 °С. Таким образом, для растворения циркония при получении слитков необходима температура плавки не ниже 800 °С. Снижение температуры заливки ниже 800 °С приводит к выделению первичных кристаллов  $Al_3Zr$ .

Исследование микроструктуры образцов, деформированных разными маршрутами обработки, показало, что в долевом сечении катанки, прутков и проволоки наблюдается строчечное расположение частиц в направлении деформации. В поперечном сечении катанки, полученной на ЛПА, наблюдается равномерное расположение дисперсных частиц по объему образца. Исследование прутков после СПП показало, что их структура сохраняет те же составляющие, что и в литом состоянии. В прутках, полученных из слитка сплава Al-0,20 %Zr-0,20 %Fe, помимо железосодержащих фаз отчетливо выделяются достаточно мелкие фазы  $Al_3Zr$ , различимые при увеличении 1000 крат.

Таблица 4. Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 1, полученных разными маршрутами обработки

Метод обработки	Слиток	Пруток	Проволока
ЛПА			
СПП			
СЛИПП	—		


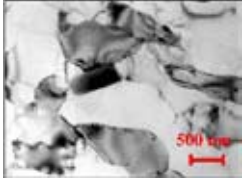


Структура всех образцов прутков, полученных по методу СЛИПП, характеризуется неоднородным распределением фаз по сечению алюминиевого твердого раствора (табл. 5). В отличие от прутков, полученных методом СПП, здесь наблюдаются более грубые скопления железосодержащих частиц и алюминидов циркония. Кроме того, в прутках обнаружены мелкие частицы  $Al_3Zr$ , чего не наблюдалось в слитках и деформированных заготовках данной плавки, полученных другими методами. Применение СЛИПП дает возможность получить деформированные и отожженные полуфабрикаты с достаточно хорошим сочетанием прочностных, пластических и электрофизических свойств, при этом пластические свойства выше, чем у полуфабрикатов, изготовленных способом СПП, что позволяет применять высокие суммарные степени деформации при волочении (до 95 %) без использования промежуточных отжигов. Следует отметить также, что холодная деформация при получении проволоки приводит к дроблению частиц  $Al_3Zr$ , и они представляют скопления мелких, близких к округлой форме, частиц, тогда как в соответствующих прутках большинство частиц имеет пластинчатую форму.

Исследование микроструктуры образцов после РКУП проводили методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100 фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 200 кВ, оснащенный приставкой INCA x-sight для проведения энергодисперсионного анализа наноразмерных элементов тонкой структуры. Электронно-микроскопический анализ прутков методом ПЭМ после обработки способом РКУП показал, что исходная структура сплава полностью трансформируется в УМЗ, а проведенный количественный анализ микроструктуры позволил оценить средний размер зерен после ИПД, который составил в среднем  $(647 \pm 29)$  нм (табл. 5).

Проведенные экспериментальные исследования показывают принципиальную возможность получения деформированных полуфабрикатов с требуемым сочетанием физико-механических характеристик. По сравнению с традиционными методами литья-прокатки на ЛПА применение способов СПП и СЛИПП обеспечивает получение высокого уровня механических характеристик деформированных полуфабрикатов при заметном сокращении переходов обработки. Кроме того, использование метода РКУП, отличающегося более высокой интенсивностью пластической деформации, в сочетании со способами СПП и СЛИПП позволяет добиться дополнительного упрочнения прутков и проволоки за счет формирования в них УМЗ структуры с размерами зерен 618-676 нм.

Таблица 5. Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 4, полученных разными маршрутами обработки

Полуфабрикат	СЛИПП	СЛИПП-РКУП
Пруток диаметром 9 мм		

### **Выводы**

1. Для промышленного внедрения можно рекомендовать сплавы с содержанием циркония и железа на уровне 0,15-0,20 % Zr и 0,10-0,15 % Fe для изготовления проволоки типа АТ1 по стандарту IEC 62004-07 без термической обработки, а также 0,25-0,30 % Zr и 0,2-0,25 % Fe для состояния проволоки АТ3 с термической обработкой.

2. Деформированные полуфабрикаты, полученные способом совмещенной прокатки-прессования, отличаются повышенными прочностными характеристиками и достаточной технологичностью при дальнейшей холодной обработке, а прутки и проволока, полученные способом совмещенного литья, прокатки и прессования, обладают более высокими пластическими свойствами и электропроводностью.

3. Сочетание при обработке сплавов системы Al-Zr способов совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации позволяет добиться дополнительного повышения прочностных характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr и достичь при изготовлении проволоки требований стандарта IEC 62004-07 по типу АТ2.

### **Список литературы**

- [1] Прохоров А.Ю., Белов Н.А., Алабин А.Н. // Литейщик России. 2010. № 4. С. 30-34.
- [2] Рааб Г.И., Мурашкин М.Ю., Валиев Р.З. // Цветные металлы-2011: Сб. докладов межд. III международного конгресса. Красноярск, 2011. С. 500-501.
- [3] Трифоненков Л.П., Довженко Н.Н., Сидельников С.Б. и др. Цветные металлы-2011: Сб. докладов III Международного конгресса. Красноярск, 2011. С. 560-563.