

- Serebrovsky, V.I. Sposob of electrolytic sedimentation of an alloy iron-tungsten / V.I. Serebrovsky [etc.] // the Patent for the invention. №2192509. 2001. 6 p.
- Pijavsky, the River With. Galvanic coverings / R.S. Pijavsky // Kiev: Technics. 1975. 174 p.
- Kudryavtsev, N.T. electrolytic of a covering / N.T. Kudryavtsev // M: Chemistry. 1979. 352 p.
- Galvanic coverings in mechanical engineering: a directory / under the editorship of M.A. Shlugera // M: Mechanical engineering. 1985. T. 1. 240 p. T. 2. 246 p.
- Gadalov, V.N. Hardening of details of transport cars by galvanic coverings / V.N. Gadalov, V.I. Serebrovsky, N.V. Konjaev [etc.] // Welding and related technologies in mechanical engineering and electronics. Kursk. 2003. №. 5. P. 86–92.

УДК 621.777:621.771.22

Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Трифоненков Л.П., Первухин М.В., Баранов В.Н., Лопатина Е.С., Довженко И.Н., Беспалов В.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА И ОЦЕНКА СВОЙСТВ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Zr ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДНИКОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЛИТЬЯ И ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологии литья, качества шихтовых материалов и методов обработки на свойства и структуру литых и деформированных полуфабрикатов из сплава системы Al–Zr. Изучена структура и свойства металла образцов, полученных с использованием операций литья, совмещенной прокатки-прессования, совмещенного литья и прокатки – прессования, горячей сортовой прокатки, волочения и отжига. Приведены данные и по прочностным, пластическим свойствам полученных образцов, их микротвердости и удельного электросопротивления. Проведен сравнительный анализ влияния методов обработки на механические и электрофизические свойства полуфабрикатов и сделаны выводы о практическом применении исследуемого сплава для производства электропроводников.

Ключевые слова: переходные металлы, алюминиевые сплавы, совмещенные процессы, литье, прокатка, прессование, волочение, отжиг, механические свойства, структура, удельное электросопротивление.

The results of experimental studies on the effect casting technology, the quality of charge materials and processing techniques on the properties and structure of the cast and deformed semi-finished products of Al-Zr alloy. The structure and properties of the metal samples produced using casting operations, combined rolling-extrusion, combined casting and rolling-extrusion, hot flat-and-edge rolling, wire drawing and annealing was studied. The data concerning strength, plastic properties, microhardness and electrical resistivity of the samples obtained were presented. A comparative analysis of the influence of processing methods on the mechanical and electrical properties of semi-finished products was carried out and the conclusions about practical application for electric conductors of the alloy studied were made.

Key words: transition metals, aluminum alloys, combined processes, casting, rolling, extrusion, drawing, annealing, mechanical properties, structure, electrical resistivity.

В связи с изменением требований потребителей по механическим свойствам к деформируемым полуфабрикатам, используемым в силовых кабелях и проводах токопроводящих жил, резко возрастает потребление электротехнической катанки из сплавов алюминия. Реализуемая на рынках катанка для производства проводов и кабелей из сплава марки АВЕ имеет в качестве легирующих добавок кремний и магний, которые увеличивают прочностные характеристики, но существенно снижают электрическую проводимость проводов. С целью снижения потерь при передаче электроэнергии необходимо разрабатывать новые алюминиевые сплавы, которые должны при высокой механической прочности иметь удовлетворительные характеристики по электропроводности. Перспективы расширения рынков сбыта проводов с новыми свойствами, прежде всего в замене алюминиевых линий электропередач, выработавших свой ресурс, переводе линий электропередач на изолированные провода или провода со специальными свойствами (стойкими к погодным условиям, обледенению, условиям высокой вибрации, высокой или низкой температуре). В связи с низкой стоимостью проводов из алюминиевых сплавов по сравнению с медными также имеется перспектива замены части медных силовых кабелей на кабели с использованием проводов из новых алюминиевых сплавов.

Основными методами получения деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов являют-

ся методы непрерывного литья-прокатки с использованием литейно-прокатных агрегатов (ЛПА) и методы совмещенной обработки с использованием операций непрерывного литья, прокатки и прессования [1–3]. Существующие литейно-прокатные комплексы не обладают всем необходимым оборудованием для получения годной продукции из алюминиевых сплавов с повышенными прочностными характеристиками в виде катанки с заданными свойствами и надежно повторяемым качеством. Поэтому при разработке технологии получения деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов с редкоземельными [4] и переходными металлами, обладающих комплексом новых физических свойств, целесообразно использование высокопроизводительных и энергосберегающих методов совмещенной обработки. Проведенные исследования, таким образом, были направлены на изучение влияния особенностей технологии получения литых и деформированных полуфабрикатов с применением этих методов на механические и электрофизические свойства образцов из сплавов системы Al–Zr, в которых в качестве основного легирующего элемента был выбран цирконий с содержанием его в сплаве в количестве 0,1–0,3 масс. %.

Для приготовления сплавов электротехнического назначения использовали цирконий в виде брикетов (80% Zr, остальное – флюс) фирмы HOESH и сплавленную лигатуру Al–Zr голландского производства фирмы KBM (рис. 1).

Для металлографического исследования сплавленной лигатуры Al–Zr были вырезаны два образца: из середины лигатурной плитки и верхней прикоррковой зоны. Макроструктуру лигатуры изучали путем визуального осмотра и с применением стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C, Carl Zeiss.

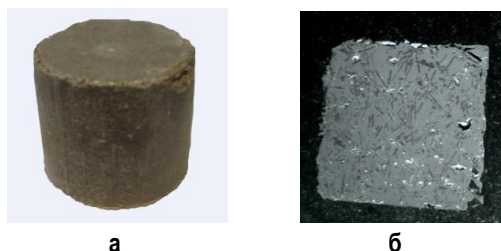


Рис. 1. Внешний вид и макроструктура цирконий содержащих лигатур Al–Zr: а – порошковая; б – сплавленная

Микроскопический анализ лигатуры проводили на микроскопе Axio Observer.A1m (Carl Zeiss). Микрошлифы изготавливали на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520, Germany, и расходных материалах фирмы Lam Plan, France, по методикам, предоставленным ООО «Митэла». Микрошлифы травили в растворе фтористоводородной кислоты.

Количественную оценку микроструктуры проводили с помощью программы для анализа цифровых изображений AxioVizion (Carl Zeiss) с использованием измерительных модулей Interactive Measurement (Program Wizard).

Визуальный осмотр лигатуры показал, что на поверхности наблюдается небольшое количество пор размером до 3,3 мм. На шлифах исследуемых образцов из середины лигатурной плитки наблюдаются однородно распределенные кристаллы Al_3Zr , размеры и характер распределения алюминидов различны. В образцах, вырезанных из прикоррковой зоны, структура более неоднородная, а по сечению наблюдаются более мелкие кристаллы Al_3Zr .

Микроструктура исследуемой лигатуры представляет собой твердый раствор на основе алюминия и достаточно крупные интерметаллидные частицы Al_3Zr , закристаллизовавшиеся по перитектической реакции в виде игл.

Стереометрический анализ лигатуры Al–Zr представлен в табл. 1.

Таблица 1

Результаты стереометрического анализа лигатуры Al–Zr

Количественные характеристики микроструктуры	Середина слитка	Прикоррковая зона
Средний размер частиц Al_3Zr , мкм	182×55	142×46
Минимальный размер частиц Al_3Zr , мкм	20×14	18×12
Максимальный размер частиц Al_3Zr , мкм	1454×83	753×86
Объемная доля частиц Al_3Zr , %	16,5±0,7	13,5±3,9
Средняя площадь частиц Al_3Zr , мкм ²	11 760	5 456

Приготовление новых низколегированных алюминиевых сплавов с добавками циркония осуществляли в высокочастотной плавильной установке. Предварительно просушенную лигатуру Al–Zr расчетного состава

и массы вводили под зеркало расплава, предварительно нагретого до температуры 750–900 °С. Расплавы тщательно перемешивали от 1 до 3 мин и после этого подвергали выдержке в печи в интервале 5–20 мин. Полученный сплав разливали в подогретые изложницы.

Макроструктура слитков преимущественно состоит из зоны столбчатых кристаллов, а в центре слитка наблюдаются крупные равноосные кристаллы (рис. 2).

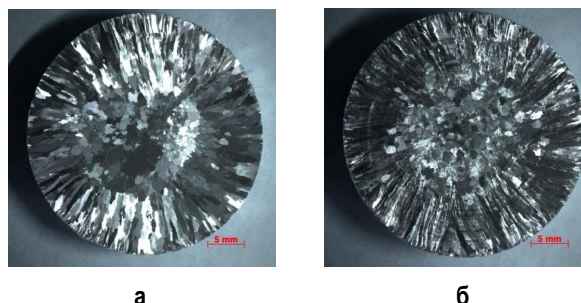


Рис. 2. Макроструктура слитков Al–Zr, полученных на порошковой лигатуре:

а – температура плавки 800±100С, время выдержки 5 мин; б – температура плавки 800±100С, время выдержки 10 мин

Далее из полученных слитков получали деформированные полуфабрикаты в виде прутков диаметром 9 мм по следующим технологическим схемам:

- горячая сортовая прокатки (ГСП) из литой заготовки размерами 14×14 мм;
- совмещенная прокатка-прессование (СПП+ЭМК) из литой заготовки диаметром 15 мм, полученной с использованием электромагнитного кристаллизатора;
- совмещенная прокатка-прессование (СПП) литой заготовки размерами 14×14 мм;
- совмещенное литье и прокатка-прессование (СЛИПП).

С целью исследования изменения механических свойств деформируемых полуфабрикатов при применении холодной деформации прутков, полученный по различным методам, подвергали волочению. При этом изготавливали проволоку диаметром 2 мм, которую затем подвергали отжигу по ступенчатому режиму.

Сортовую прокатку проводили на сортопркатном стане AMBIFILO VELOCE ROSEN с диаметром валков 130 мм, при этом литую заготовку нагревали в электрической печи до температуры 550°С, прокатывали в калибрах и получали прутки диаметром 9 мм.

Совмещенную прокатку-прессование осуществляли на экспериментальной установке совмещенной обработки, смонтированной на базе прокатного стана дуо 200 с диаметром валков 200 мм [1,4]. При этом в первом случае использовали литые заготовки, полученные в ЭМК, а во втором – заготовки, отлитые в изложницу. В соответствии с технологией обработки заготовки нагревали в электрической камерной печи до температуры 550°С и задавали их в калибр валков экспериментальной установки. К валкам с помощью гидроцилиндра была поджата матрица с калибрующим отверстием диаметром 9 мм, поэтому в качестве готового изделия получали прутки круглого сечения указанного размера.

Технологию совмещенного литья и прокатки-прессования реализовали на той же экспериментальной установке, однако в валки в этом случае заливали

расплав металла, который последовательно кристаллизовался в калибре вращающихся валков, обжимался ими и выдавливался через матрицу в виде горяче-прессованного прутка диаметром 9 мм.

Волочение проводили из полученных заготовок в виде прутков и катанки на цепном стане без промежуточных отжигов и получали проволоку диаметром 2 мм. Далее производили отжиг проволоки сначала при температуре 300°C, а затем при температуре 450°C при фиксированном времени выдержки.

Для исследований механических свойств деформируемых полуфабрикатов использовали универсальную электромеханическую машину LFM 400 усилием 400 кН. Свойства литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства и удельное электросопротивление полуфабрикатов из сплава Al-Zr

№	Метод	Механические свойства прутка диаметром 9 мм и литой заготовки		Механические свойства проволоки диаметром 2 мм в деформированном и отожженном состоянии		Удельное электросопротивление проволоки, Ом·мм ² /м
		σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	
1	ГСП	104,9	18,8	182,9	2,3	0,0309
		68,1	34,3	66,7	21,0	0,0304
2	ГСП	105,0	17,3	186,0	1,7	0,0294
		64,1	42,2	67,4	40,0	0,0290
3	ГСП	101,4	18,6	180,8	2,0	0,0285
		61,3	21,7	64,6	33,0	0,0282
4	ГСП	100,6	19,0	187,2	2,0	0,0296
		61,8	24,1	63,5	31,0	29,19
5	ГСП	106,2	23,8	186,8	2,0	0,0301
		69,9	26,1	65,5	33,0	0,0301
6	ГСП	102,5	18,1	190,7	2,0	0,0295
		63,2	31,0	66,6	32,6	0,0292
7	ГСП	103,1	21,7	186,3	2,7	0,0310
		65,7	38,9	61,2	28,3	0,0304
8	ГСП	101,0	21,8	180,9	2,0	0,0287
		58,4	21,5	60,2	32,0	0,0287
9	СПП	127,5	18,4	227,0	2,0	0,0308
		68,1	34,3	70,0	26,0	0,0299
10	СПП	117,7	21,5	219,5	1,3	0,0288
		64,1	42,2	72,6	29,0	0,0286
11	СПП	116,6	22,0	228,6	2,2	0,0282
		61,3	21,7	76,4	31,0	0,0281
12	СПП	125,3	16,7	222,4	0,7	0,0283
		61,8	24,1	74,8	32,0	0,0272
13	СПП	120,8	15,2	226,5	1,7	0,0298
		69,9	26,1	69,1	35,0	0,0294
14	СПП	115,9	13,9	230,8	2,0	0,0294
		63,2	31,0	76,5	33,0	0,0291
15	СПП	117,5	18,5	226,1	1,9	0,0311
		65,7	38,9	81,8	34,3	0,304
16	СПП	127,4	16,6	223,2	2,0	0,0290
		58,4	21,5	75,9	37,7	0,0288
17	СПП	123,7	17,3	212,8	2,4	0,0289
		62,5	39,8	72,0	36,0	0,0284
18	СПП	125,2	16,9	217,7	2,9	0,0286
		61,40	39,5	74,7	41,0	0,0283
19	СПП	138,2	20,3	237,6	2,7	0,0297
		60,72	32,8	78,5	28,0	0,0287
20	СПП+ЭМК	135,5	20,4	215,3	3,5	0,0313
		110,5	39,4	73,2	38,2	0,305
21	СЛИПП	121,1	21,1	193,8	3,0	0,0284
				72,9	36,0	0,0275
22	СЛИПП	105,8	28,8	212,4	3,0	0,0294
				80,2	34,0	0,0282

Результаты исследования микроструктуры металла опытных образцов, полученных различными методами, приведены на рис.3–5.

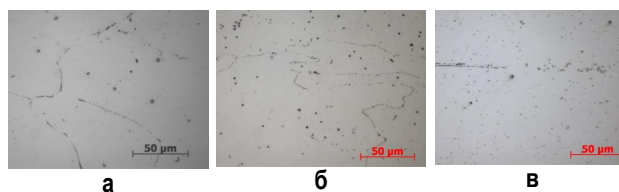


Рис. 3. Микроструктура литой заготовки (а), прутка (б) и проволоки (в) опытного образца №5, полученного методом ГСП (x500)

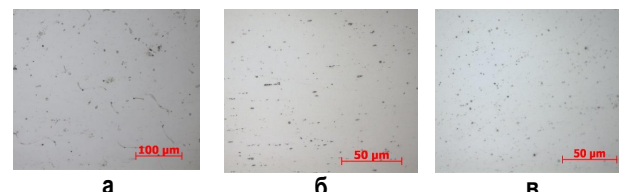


Рис. 4. Микроструктура литой заготовки (а), прутка (б) и проволоки (в) опытного образца №17, полученного методом СПП (x500)

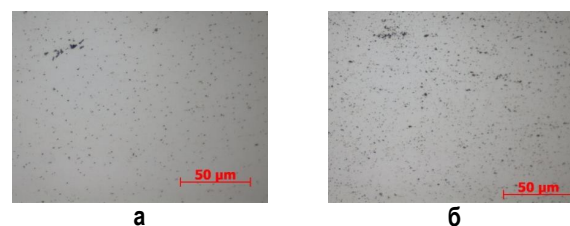


Рис. 5. Микроструктура прутка (а) и проволоки (б) опытного образца №21, полученного методом СЛИПП (x500)

Микроструктура исследуемых слитков для образцов 1-16 представляет собой дендриты α -твердого раствора, избыточные двойные и тройные фазы (рис. 3, а). Избыточные фазы расположены по границам зерен и дендритных ячеек, имеют пластинчатую, скелетную и сферическую форму. Микроструктурным методом анализа не выявлено различий в структуре сплавов исследуемых слитков. В микроструктуре сплавов системы Al-Zr обнаружены дисперсные (менее 10 мкм) включения игольчатого строения. Вследствие невысокого разрешения оптического микроскопа, выявленные фазы были детально исследованы на растровом электронном микроскопе. Форма и расположение первичных кристаллов Al_3Zr , обнаруженных в микроструктуре исследуемых слитков, свидетельствует о том, что частицы циркониевой фазы не растворились при получении расплава в исследуемом диапазоне температур. Таким образом, исследуемые температуры плавки и заливки расплава для образцов 1-16 недостаточны для растворения вводимых в виде порошковой лигатуры интерметаллидных частиц Al_3Zr , что подтверждается данными работы [5]. В слитке образца 17, который был получен при температурах плавки и заливки, рекомендуемых в работе [5] в интервале 800–900°C, по результатам микроско-

пического анализа частицы Al_3Zr не обнаружены (рис. 4, а). Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис. 6) также подтвердили, что в слитке образца 17 фаз, содержащих цирконий, не наблюдается. Микроструктура состоит из дендритов α -твердого раствора на основе алюминия и избыточных фаз $AlFe$ и $AlFeSi$ с присутствием в них кислорода (табл. 3).

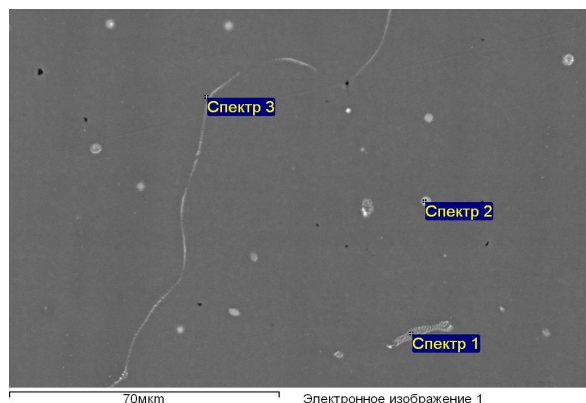


Рис. 6. Микроструктура литого образца 17 по данным микрорентгеноспектрального анализа

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа для литого образца 17 из сплава $Al-Zr$

Спектр	O	Al	Si	Fe
Спектр 1	3.70	92.42	1.28	2.60
Спектр 2	5.95	87.41	1.16	5.48
Спектр 3	3.24	95.57	1.18	–

Металлографический анализ деформированных полуфабрикатов (образцы 1–16) в виде прутков для технологий ГСП (рис. 3, б) и СПП показал, что микроструктура всех образцов состоит из α -твердого раствора и дисперсных частиц фаз $AlFe$, $AlFeSi$ и Al_3Zr . При деформации прутков форма и размеры интерметаллидных фаз Al_3Zr существенно не изменились по сравнению со строением включений в слитках. В долевом сечении прутка наблюдается ориентированность частиц железосодержащих фаз и включений Al_3Zr в направлении оси деформации. Микроструктура деформированных полуфабрикатов, полученных СПП и сортовой прокаткой, не имеет различий. Исследования также показали, что прутки, изготовленные из литого образца 17 (рис. 4, б), сохраняют те же структурные составляющие, что и в литом состоянии, при этом фазы Al_3Zr не обнаружено.

Исследование проволоки, полученной волочением из прутков, изготовленных двумя методами: ГСП и СПП, показало, что в долевом сечении проволоки наблюдается строчечное расположение дисперсных частиц избыточных фаз, раздробленных при холодном волочении в направлении оси деформации (рис. 3, в). Волочение прутков привело к измельчению включений Al_3Zr и вытягиванию их в строчки. В проволоке, полученной из прутков после сортовой прокатки, обнаружена строчечность структуры в виде скопления частиц Al_3Zr , которая является причиной расслоения в данном изделии. В проволоке, изготовленной из прутков после СПП, расслоений не обнаружено (рис. 4, в).

Таким образом, микроструктура полуфабрикатов, полученных по технологии совмещенной прокатки – прессования и последующего волочения, зависит от качества слитка и метода его получения. Если исходная структура слитка не содержит интерметаллидных частиц Al_3Zr , то и в деформированном состоянии их не наблюдается. Использование электромагнитного кристаллизатора позволяет уменьшить величину зерна и получить более высокие прочностные и пластические характеристики (см. табл. 2).

Структура всех образцов прутков, полученных по методу СЛИПП, характеризуется неоднородным распределением фаз по сечению алюминиевого твердого раствора (рис. 5, а). 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. Частицы алюминидов вытянуты вдоль направления деформации. Выделение некоторого количества включений Al_3Zr , по-видимому, связано с снижением температуры при переплавке сплава для СЛИПП. Холодное волочение при получении проволоки приводит к дроблению частиц Al_3Zr , в результате чего они образуют строчки из мелких частиц, близких к округлой форме, тогда как в прутках, полученных СЛИПП, большинство частиц имеет игольчатую форму. Неравномерность распределения структурных составляющих наследуется и в структуре проволоки (рис. 5, б).

Измерения микротвердости (табл. 4) деформированных полуфабрикатов, полученных различными методами, показали, что наибольшие значения микротвердости наблюдаются у изделий, полученных методом СПП. Уровень значений микротвердости для образцов, полученных методами ГСП и СЛИПП, несколько ниже. Кроме того, установлено, что с увеличением степени холодной деформации также наблюдается повышение микротвердости.

Таблица 4

Результаты измерения микротвердости деформированных полуфабрикатов $Al-Zr$, изготовленных различными методами, кгс/мм²

Номер образца	ГСП: пруток, проволока	Номер образца	СПП: пруток, проволока	Номер образца	СПП и СЛИПП: пруток, проволока
1	43,5±1,6 43,2±1,1	1	45,4±0,8 48,7±0,9	1	40,8±2,1 49,4±1,2
2	43,8±1,3 44,4±0,5	2	43,4±0,6 46,5±0,6	2	40,5±2,5 49,4±1,8
3	41,0±1,1 42,7±2,2	3	43,2±0,7 46,8±1,2	3	42,2±1,6 46,1±0,5
4	42,3±0,4 43,6±0,9	4	43,3±1,8 47,7±1,4	4	43,3±1,6 47,1±1,2
5	43,8±0,3 42,6±0,7	5	43,1±1,8 46,7±1,8	5	35,9±0,7 41,9±1,4
6	42,0±1,0 43,7±0,8	6	44,6±1,2 48,8±0,8	6	43,5±1,9 45,9±1,7
7	44,2±0,9 43,5±1,0	7	44,0±0,9 47,3±0,5	7	
8	43,8±0,8 43,6±1,3	8	43,1±1,6 48,3±0,7	8	

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

Сплавы алюминия с содержанием циркония 0,1-0,3% могут применяться для изготовления электропроводников с повышенными механическими и электрофизическими свойствами, при этом временное сопротивление разрыву для горячедеформированных полуфабрикатов достигает максимальных значений порядка 130 МПа, для холоднодеформированных – 230 МПа, а удельное электросопротивление для них находится в диапазоне 0,0285–0,0295 Ом·мм²/м.

Разработаны режимы литья и технология приготовления новых сплавов с применением сплавленных и порошковых лигатур [6].

Повышенные прочностные характеристики наблюдаются у образцов из новых сплавов, полученных по технологиям совмещенной обработки, причем получение заготовки с применением литья в электромагнитный кристаллизатор и обработка методом СПП дает возможность получить мелкозернистую однородную структуру металла и наиболее высокие значения временного сопротивления разрыву и относительного удлинения. Однако результаты измерений на этих образцах удельного электросопротивления показали сравнительно высокие значения этого параметра.

Применение метода СЛИПП, несмотря на неоднородное распределением фаз по сечению алюминиевого твердого раствора, дает возможность получить достаточно хорошее сочетание прочностных, пластических и электрофизических характеристик.

Проведение двухступенчатого отжига проволоки, полученной холодным волочением со степенями деформации до 70%, дает возможность восстановить пластические свойства металла и снизить значения удельного электросопротивления.

Исследования проведены при реализации государственной программы поддержки развития кооперации и использования субсидий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и ООО «РУСАЛ ИТЦ», совместно участвующих в рамках договора

№13.G25.31.0083 с Министерством образования и науки России в выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства.

Список литературы

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
2. Повышение эффективности производства профилей из алюминиевых сплавов на основе управления тепловыми условиями процесса прессования / Беляев С.В., Довженко Н.Н., Сидельников С.Б. и др. // Журнал Сибирского федерального университета. 2009. №4. С. 418–426.
3. Выбор оптимальных зазоров в калибре при совмещенной прокатке-прессовании / Беляев С.В., Довженко Н.Н., Сидельников С.Б. и др. // Журнал Сибирского федерального университета. 2010. №3. С. 411–420.
4. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al–PЗМ, полученных совмещенными методами литья и обработки давлением / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Ворошилов Д.С. и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 23–28.
5. Прохоров А.Ю., Белов Н.А., Алабин А.Н. Особенности технологии плавки и литья слитков проводниковых алюминий-циркониевых сплавов в промышленных условиях // Литейщик России. 2010. №4. С. 30–34.
6. Исследование структуры и свойств литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al–Zr, полученных совмещенными методами литья и прокатки-прессования / Падалка В.А., Довженко Н.Н., Сидельников С.Б. и др. // Литейщик России. 2011. №5. С. 33–36.

Bibliography

1. S.B. Sidelnikov, N.N. Dovzhenko, N.N. Zagirov. Combined methods of treatments of non-ferrous metals and alloys: a monograph. // M.: MAKS Press, 2005. p. 344.
2. S.V. Belyaev, N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov etc. Increase of efficiency of aluminum alloy profile production on the basis of management of thermal conditions during pressing. The Journal of Siberian State University. № 4. 2009. p.418–426.
3. S.V. Belyaev, N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov etc. The choice of optimum clearance in caliber for combined rolling-pressing process. Journal of Siberian State University. № 3. 2010. p. 411–420.
4. S.B. Sidelnikov, N.N. Dovzhenko, D.S. Voroshilov etc. The study of metal structure and assessment of the test samples properties of Al-REM alloys obtained by combined methods of casting and forming. Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University under the name of G.I. Nosov. Magnitogorsk. 2011. № 2.
5. A.U. Prokhorov, N.A. Belov, A.N. Alabin. Technology features of melting and casting of aluminum-zirconium alloy conductors in industrial environments. Russian caster. 2010. № 4. p.30–34.
6. V.A. Padalka, N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov etc. Investigation of the structure and properties of cast and deformed semi-finished products of alloys of the Al-Zr, obtained by combined methods of casting and rolling-pressing. Foundryman of Russia. 2011. №5. p. 33–36.