

УДК 621.777:621.771.22

DOI dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-4-32-37

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПРИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АІ–РЗМ НА ОСНОВЕ ПОЭТАПНОЙ ОЦЕНКИ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2015 г. С.Б. Сидельников, Н.Н. Загиров, Е.С. Лопатина, Р.И. Галиев,
Э.А. Рудницкий, Д.С. Ворошилов, А.С. Сидельников

Институт цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета
(ИЦМиМ СФУ), г. Красноярск

Статья поступила в редакцию 24.12.13 г., доработана 27.02.14 г., подписана в печать 12.03.14 г.

Приведены данные экспериментальных исследований по определению механических свойств длинномерных деформируемых полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплавов алюминия с редкоземельными металлами, полученных с использованием методов совмещенной обработки. Применение совмещенной технологии литья, прокатки и прессования дает возможность увеличить прочность горячепрессованных прутков в среднем на 15–20 % по сравнению с совмещенными процессами прокатки и прессования литой заготовки, полученной в электромагнитном кристаллизаторе. Показано также, что уменьшение содержания РЗМ в сплаве приводит к снижению прочностных и повышению пластических характеристик. При этом, варьируя величиной суммарной степени деформации при волочении и применяя отжиги, можно управлять уровнем физико-механических характеристик конечной продукции.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, редкоземельные металлы, литье, прокатка, прессование, совмещенные методы, механические свойства, пластичность, прочность.

The data of experimental studies on determining the mechanical properties of long-length deformed semifinished products in a form of bars and wire made of alloys of aluminum with rare-earth metals, which are fabricated using the combined treatment methods, are presented. The application of the combined technology of casting, rolling, and pressing makes it possible to increase the strength of hot-extruded rod by 15–20 % on average compared with combined rolling–extruding the cast billet formed in an electromagnetic crystallizer. It is also shown that a decrease in the REM content in the alloy leads to the strength reduction and an increase in plastic characteristics. Herewith, it is possible to control the level of physicomachanical characteristics of the final product varying the summary deformation ratio during drawing and applying annealing.

Keywords: aluminum alloys, rare-earth metals, casting, rolling, extruding, combined methods, mechanical properties, plasticity, strength.

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач при изготовлении продукции электротехнического назначения является разработка новых технологий совмещенной обработки для получения длинномерных полуфабрикатов в виде прутков, проволоки или катанки из алюминиевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы.

Анализ научно-технической литературы [1–11] показал, что присутствие РЗМ в АІ-сплавах ведет к улучшению их характеристик: повышаются жаропрочность, устойчивость к коррозии, вязкость сплава и физико-химические свойства в целом.

Авторами [12, 13] предложены новые сплавы, имеющие в своем составе различные редкоземель-

Сидельников С.Б. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением ИЦМиМ СФУ (660025, г. Красноярск, ул. Красноярский рабочий, 95). Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Загиров Н.Н. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: kafOMD_1@mail.ru.

Галиев Р.И. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: gri1979@mail.ru.

Рудницкий Э.А. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: edvard.ru24@gmail.com.

Ворошилов Д.С. – канд. техн. наук, ст. преподаватель той же кафедры. E-mail: sibdrug@mail.ru.

Лопатина Е.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и термической обработки металлов ИЦМиМ СФУ. E-mail: chudo_lyuda@mail.ru.

Сидельников А.С. – ассистент кафедры литейного производства ИЦМиМ СФУ. E-mail: andsidelnikov@yandex.ru.

ные металлы, что позволило варьировать механические и электрофизические свойства.

Применяемые на данный момент методы производства такого рода изделий имеют ряд недостатков, основным из которых является низкая пластичность сплавов системы Al—PЗМ, особенно высоколегированных. Для изготовления проволоки из таких материалов в 1980-х годах применялась многоступенчатая технология, разработанная в ВИЛСе (г. Москва), включающая 17 технологических переделов, в том числе литье гранул, дегазацию, спекание гранул, прессование и последующее волочение до заданного размера с промежуточными отжигами [9, 10]. Альтернативой ей могут стать методы совмещенной обработки, когда последовательно осуществляются литье заготовки в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) [11] и ее обработка путем совмещенной прокатки—прессования (СПП), а в случае использования жидкого металла в одном цикле сочетаются процессы литья, кристаллизации и деформации металла, и этот способ известен как метод совмещенного литья, прокатки и прессования (СЛИПП) [14].

Проведенные ранее исследования показали, что применение способов совмещенной обработки для мягких сплавов алюминия не вызывает особых трудностей и может быть реализовано в промышленном варианте [14]. Однако получение пресс-изделий из сплавов, имеющих малую пластичность, требует специальных исследований формоизменения и свойств металла. Так, в работе [15] было экспериментально установлено, что для формирования требуемой заготовки диаметром 17 мм методом литья в ЭМК под последующую обработку СПП (при содержании в сплаве 7 % PЗМ) необходимо чтобы при реализации процесса средняя скорость литья составляла 7 мм/с, а температура расплава — 750÷780 °С.

Единой универсальной технологической цепочки операций, позволяющей с наименьшими энерго- и трудозатратами сформировать у получаемой продукции заданного типоразмера необходимый комплекс физико-механических свойств, не существует. Поэтому целью работы являлись:

— поэтапное изучение характера формирования и изменения прочностных и пластических характеристик металла заготовки из сплавов системы Al—PЗМ;

— оценка их термостойкости при осуществлении отдельных операций, входящих в обобщенную вариативную технологическую схему производства длинномерных полуфабрикатов;

— разработка на основе полученных результатов практических рекомендаций по выбору наиболее рационального варианта реализации технологической схемы в зависимости от требований, предъявляемых к тому или иному виду продукции.

Исходные материалы и методика эксперимента

Для прогнозирования поведения металла в ходе процесса СПП с точки зрения его принципиальной реализуемости из полуфабрикатов, полученных из алюминиевого сплава с содержанием PЗМ 7 % (ТУ 1-809-1038-96), вытачивали образцы размерами, удовлетворяющими ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9651-84 (для испытаний при комнатной и повышенных до 1200 °С температурах соответственно). Растяжение этих образцов до момента разрыва проводили на универсальной электромеханической испытательной машине LFM400, оборудованной стационарной печью для их нагрева до заданной температуры ($t = 20, 200, 350, 450, 500$ и 550 °С), которая в ходе эксперимента поддерживалась постоянной. Такой диапазон изменения t обусловлен потенциально возможными температурными условиями осуществления процесса СПП. Скорость перемещения подвижного захвата испытательной машины варьировали на двух уровнях: $v = 20$ и 100 мм/мин.

В ходе испытаний для каждого значения t и v строили графики зависимости $\sigma_T(\epsilon)$ (где σ_T — напряжение текучести, определяемое как отношение усилия деформирования (P) к начальной площади поперечного сечения образца (F_0); $\epsilon = \ln l/l_0$ — величина логарифмической степени деформации, рассчитываемая по соотношению текущей (l) и начальной (l_0) длин рабочей зоны образца).

Кроме того, для каждого случая определяли предельное значение напряжения текучести, равное временному сопротивлению разрыву (σ_B), и относительное удлинение (δ). Доверительный интервал при оценке σ_B составил ± 5 МПа, а при определении δ — $\pm 0,2$ %.

Исследования микроструктуры полученных образцов литых и деформированных полуфабрикатов проводили на световом микроскопе Axio Observer. Alm («Carl Zeiss», Германия) и растровом электронном сканирующем микроскопе EVO 50 («Carl Zeiss») с энергодисперсионным микроанализатором Inca Energy 350.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты механических испытаний образцов (σ_T и σ_B) представлены на рис. 1 и в табл. 1. Анализ этих данных показывает, что, как и следовало ожидать, с повышением температуры происходит практически пропорциональное снижение прочностных характеристик литой заготовки, причем чем больше скорость деформирования, тем несколько выше уровень прочности материала (ср. рис. 1, а и б). До температур ~ 350 °С этот показатель, в зависимости от скорости растяжения, не превышает значений $\sigma_B = 170\div 180$ МПа, а при $t = 500$ °С падает до $\sigma_B = 100\div 110$ МПа.

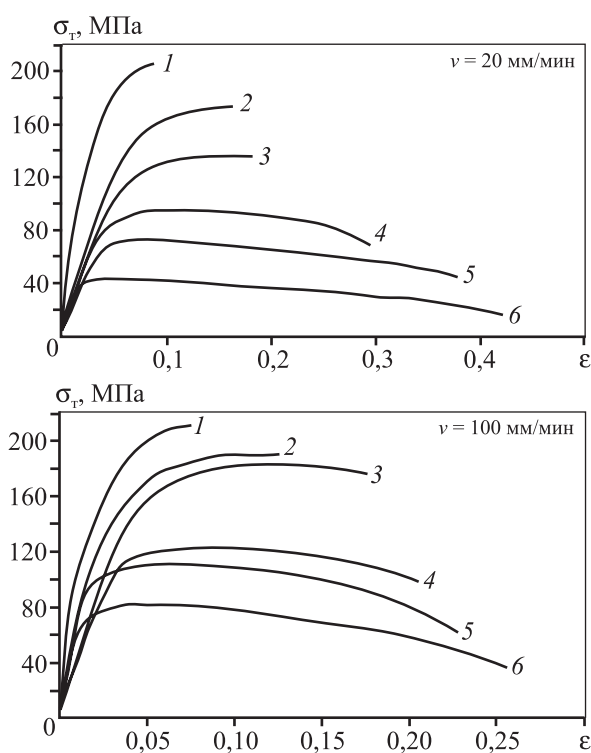


Рис. 1. Кривые текучести образцов литой заготовки после литья в ЭМК при разных скоростях растяжения и температурах испытания

1 – $t = 20$ °С, 2 – 200 °С, 3 – 350 °С, 4 – 450 °С, 5 – 500 °С, 6 – 550 °С

Таблица 1

Изменение временного сопротивления разрыву (σ_B , МПа) различных полуфабрикатов из исследуемого сплава в зависимости от температуры испытания

Процесс	Тип полуфабриката	d , мм	t , °С					
			20	200	350	450	500	550
Литье в ЭМК	Заготовка	17	200–210	180–190	160–170	110–120	90–100	50–60
СПП	Пруток	9	175–180	150–155	–	–	–	30–35
СПП	Пруток	7	190–195	175–180	–	–	–	50–60

Ориентируясь на полученные результаты, можно выбрать наиболее рациональный температурно-скоростной режим деформации металла, который, с одной стороны, обеспечивал бы протекание процесса СПП без опасности остановки валков из-за превышения уровня прочностных характеристик металла заготовки над максимально допустимыми значениями для выдавливания его через матрицу, а с другой — не создавал бы излишний резерв мощности для формирования необходимого комплекса физико-механических свойств промежуточного продукта — прутка.

Данные по механическим свойствам деформированных полуфабрикатов получили путем прокатки—прессования заготовок диаметром 17 мм, изготовленных литьем в ЭМК, на установке совмещенной обработки со скоростью вращения валков 4 об/мин. Из них были отпрессованы прутки диаметрами 9 и 7 мм с коэффициентами вытяжки $\mu = 3,6$ и $5,9$ соответственно. Температура нагрева заготовок перед подачей их в валки составляла 550 °С, а валки предварительно нагревали до 100 °С. (Отметим, что задача выявления граничных с точки зрения осуществимости процесса температурных условий не ставилась.) Далее из прутков вытачивали образцы стандартных размеров для проведения испытаний на растяжение, которые проходили при температурах $t = 20, 200$ и 550 °С и скоростях $v = 20$ и 100 мм/мин. Результаты этих исследований приведены на рис. 2.

Сопоставление приведенных данных, отражающих изменение прочностных характеристик прутков при разных температурах, свидетельствует о том, что при деформации заготовки, полученной литьем в ЭМК, упрочняющий эффект отсутствует. Наоборот, чем меньше значение коэффициента вытяжки, тем заметнее происходит разупрочнение материала. С точки зрения реализации последующего холодного волочения такая особенность формирования свойств прессованного прутка сказывается положительным образом, так как существенно увеличивается его деформационный ресурс.

Установлено, что в зависимости от исходного диа-

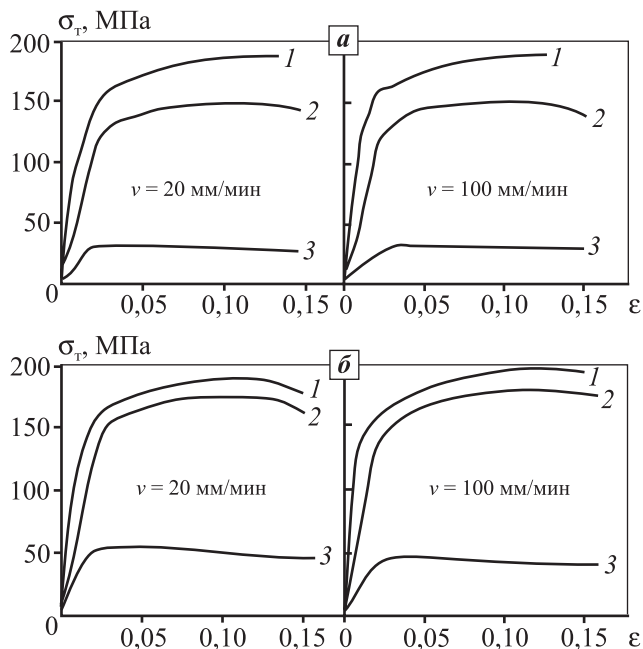


Рис. 2. Кривые текучести образцов из прутков диаметрами 9 мм (*а*) и 7 мм (*б*), полученных СПП с коэффициентами вытяжки 3,6 и 5,9 соответственно, при различных скоростях и температурах испытаний 1 – $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $550\text{ }^{\circ}\text{C}$

метра прутка, изготовленного методом СПП, можно с помощью суммарной деформации варьировать степень упрочнения получаемой из него волочением проволоки заданных размеров. Изменение скорости деформирования в рассмотренных пределах существенного влияния на значения прочностных характеристик сплава не оказывает. Фактор повышения температуры испытаний до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ отражается на характере кривых текучести лишь в незначительной степени, вызывая снижение прочности материала в среднем на 15–20 МПа. Это подтверждает данные о термостойкости сплава, из которого отпрессован пруток с небольшими коэффициентами вытяжки. Однако по-прежнему прочность прессованных прутков по сравнению с аналогичными свойствами литой заготовки будет ниже. Несколько повысить их уровень, неизбежно снизив при этом ресурс пластичности материала, можно при реализации совмещенной схемы литья и прокатки—прессования.

Исследования процесса СЛИПП, проведенные путем заливки расплава в валки установки совмещенной обработки [15], показали, что прочность полученных горячепрессованных прутков при этом возрастает в среднем на 15–20 %. Такая же тенденция наблюдается и для проволоки различного диаметра (табл. 2), изготовленной из этих прутков с по-

мощью холодной сортовой прокатки и волочения. Отметим, что наблюдаемое при этом некоторое падение ее пластичности на устойчивости процессов холодной обработки, в частности волочения, принципиально не сказывается, что выражается в отсутствии необходимости промежуточных отжигов.

Анализ слитков (рис. 3, *а*), полученных литьем в ЭМК, показал, что их структура представляет собой дендриты алюминиевого твердого раствора (светлый фон) и эвтектику $\alpha + \text{Al}_4\text{M}$ (темный фон), где М — мишметалл, в состав которого входят церий и лантан. В структуре образцов, изготовленных методом совмещенной прокатки и прессования, сохраняется дендритное строение, но появляется определенная направленность структурных составляющих (рис. 3, *б*).

У прутков, полученных методом СЛИПП (рис. 3, *в*), структура не однородна и сильно отличается в

Таблица 2

Результаты механических испытаний полуфабрикатов из исследуемого Al-сплава для разных схем совмещенной обработки

Полуфабрикат	Диаметр/размер образца, мм	δ , %	σ_b , МПа
ЭМК + СПП			
Пруток горячепрессованный	5,0	15,5	210
	7,0	19,0	190
	9,0	28,0	180
Проволока после сортовой прокатки	3,7×3,7	18,0	200
	3,1×3,1	15,0	210
	2,4×2,4	12,5	220
	2,2×2,2	10,4	230
Проволока после волочения	1,35	7,3	250
	1,0	5,2	320
	0,7	3,5	385
	0,3	0,8	450
СЛИПП			
Пруток горячепрессованный	5,0	12,0	240
	7,0	13,0	230
	9,0	13,5	210
Проволока после сортовой прокатки	3,7×3,7	12,0	220
	3,1×3,1	11,0	235
	2,4×2,4	10,5	250
	2,2×2,2	9,2	255
Проволока после волочения	1,35	5,6	290
	1,0	4,2	390
	0,7	2,8	430
	0,3	0,7	525

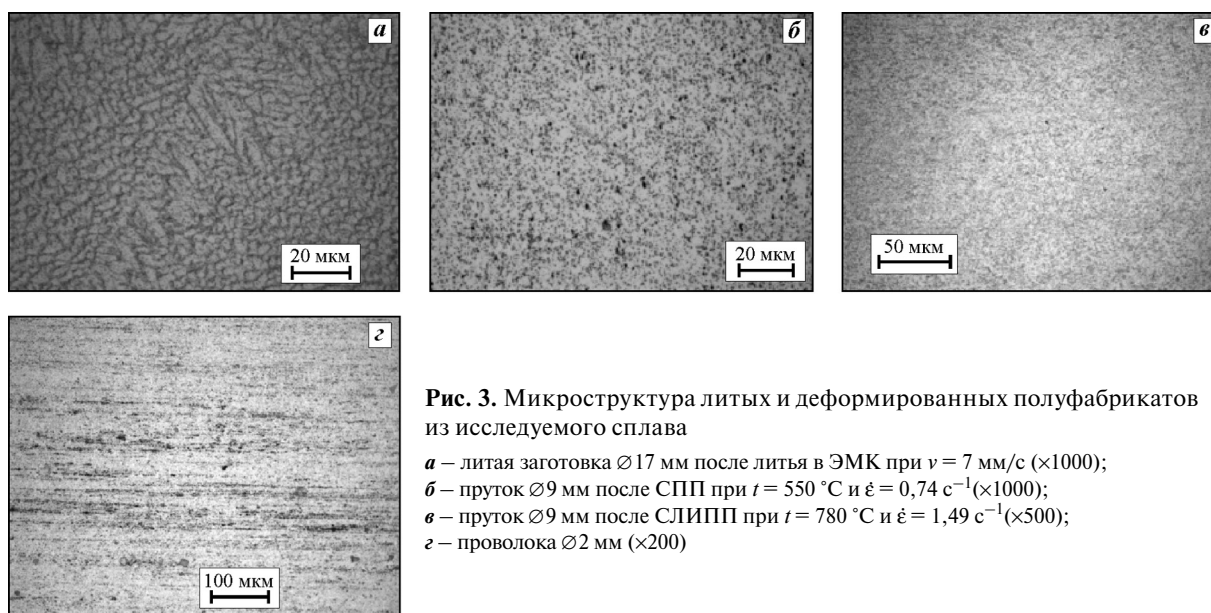


Рис. 3. Микроструктура литых и деформированных полуфабрикатов из исследуемого сплава

a – литая заготовка $\varnothing 17$ мм после литья в ЭМК при $v = 7$ мм/с ($\times 1000$);
b – пруток $\varnothing 9$ мм после СПП при $t = 550$ °С и $\dot{\epsilon} = 0,74$ с⁻¹ ($\times 1000$);
c – пруток $\varnothing 9$ мм после СЛИПП при $t = 780$ °С и $\dot{\epsilon} = 1,49$ с⁻¹ ($\times 500$);
d – проволока $\varnothing 2$ мм ($\times 200$)

Таблица 3
Изменение физико-механических свойств полуфабрикатов из сплавов системы Al–PЗМ при разном содержании легирующих компонентов

Тип полуфабриката	<i>d</i> , мм	ϵ , %	Свойства	Содержание PЗМ, %				
				0,5	1,0	2,5	3,5	7,0
Пруток после СЛИПП	9,0	–	σ_b , МПа	110–120	120–130	140–150	160–170	205–215
			δ , %	28–30	23–26	21–23	18–20	12–14
			ρ , Ом·мм ² /м	0,02791	0,02803	0,02813	0,02902	0,03125
Проволока	6,9	41	σ_b , МПа	120–130	130–140	150–160	170–180	220–230
			δ , %	15–17	12–14	9–11	7–9	5–7
	6,0	56	σ_b , МПа	140–150	140–150	160–170	180–190	230–240
			δ , %	11–13	9–11	7–9	4–6	3–4
	4,5	75	σ_b , МПа	160–170	170–180	190–200	200–210	250–260
			δ , %	5–6	4–5	4–5	3–4	2–3
	3,2	87	σ_b , МПа	170–180	180–190	200–210	210–220	270–280
			δ , %	4–5	3–4	3–4	2–3	2–3
	2,0	95	σ_b , МПа	180–190	190–200	210–220	210–220	280–290
			δ , %	3–4	2–3	2–3	2–3	1–2
ρ , Ом·мм ² /м			0,02858	0,02958	0,03064	0,03118	0,03311	

крайних и центральных зонах, что обусловлено разными скоростями деформации. В крайних зонах наблюдается однородное распределение мелких частиц по твердому раствору, а в центральных — светлые участки α -твердого раствора и темные участки эвтектики $\alpha + Al_4M$. При $t = 780$ °С неоднородность в различных слоях металла менее выражена, поэтому наиболее оптимальная структура прутков получается именно при этой температуре расплава и

скорости деформации $\dot{\epsilon} = 1,49$ с⁻¹. Микроструктура проволоки, изготовленной с применением метода СЛИПП, характеризуется волокнистым строением (рис. 3, *d*), причем с увеличением степени деформации (ϵ) эта неоднородность уменьшается.

Результаты проведенных исследований показали, что соотношение между уровнями прочности и пластичности деформированных полуфабрикатов и удельное электросопротивление (ρ) можно варь-

ровать, изменяя количество вводимых в алюминиевую основу добавок РЗМ. Из сопоставления приведенных в табл. 3 данных следует, что уменьшение содержания РЗМ в сплаве приводит к некоторому снижению прочностных характеристик проволоки, получаемой волочением, с одновременным повышением пластичности, но при этом ее электросопротивление снижается, что является следствием формирования определенного уровня механических свойств материала уже на стадии получения методом СЛИПП горячепрессованного прутка.

Можно предположить, что такая же закономерность будет прослеживаться и при реализации схемы, включающей литье в ЭМК заготовок с разным содержанием РЗМ и процесс СПП. При этом и в том и в другом случаях, варьируя суммарной степенью деформации при последующем волочении в сочетании с термообработкой (отжигами), можно управлять комплексом физико-механических параметров проволоки, достигаемым на определенных диаметрах и оговариваемым нормативными документами по условиям ее практического применения.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования выявили пути управления свойствами деформированных полуфабрикатов при различных методах совмещенной обработки сплавов системы Al—РЗМ. Анализ полученных результатов показал возможность изготовления полуфабрикатов с различным сочетанием физико-механических свойств, например, в виде проволоки с высокой электропроводностью ($\rho = 0,02858 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$) при удовлетворительной прочности или, наоборот, с высокой прочностью ($\sigma_b \sim 290 \text{ МПа}$), но сравнительно низкой электропроводностью (см. табл. 3). Это достигается применением различных схем формоизменения металла (СЛИПП или СПП) в сочетании с операциями холодного волочения и термообработки.

Полученные в настоящей работе данные были использованы при выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства совместно ООО «РУСАЛ ИТЦ» и ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки» в соответствии с договором №13.G25.31.0083 Министерства образования и науки России.

Литература

1. Савицкий В.М., Терехова В.Ф., Буров И.В. и др. Сплавы редкоземельных металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Савицкий В.М., Терехова В.Ф., Маркова И.А. и др. Редкоземельные металлы, сплавы и соединения. М.: Наука, 1973.
3. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода. 2012. №1. С. 8—15.
4. Горбунов Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев // Сб. докл. 4-го Междунар. конгр. «Цветные металлы-2012». Красноярск: ООО «Версо», 2012. С. 828—833.
5. Горбунов Ю.А. Основные характеристики и перспективы развития сплавов алюминия с высокой дисперсностью фаз легирующих элементов // Сб. докл. 5-го Междунар. конгр. «Цветные металлы-2013». Красноярск: ООО «Версо», 2013. С. 585—590.
6. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: ИД МИСиС, 2010.
7. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ. Под ред. Ф.И. Квасова, Г.Б. Строганова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1979.
8. Алюминий: свойства и физическое металловедение: Справ. изд. / Пер. с англ. Под ред. Дж.Е. Хэтча. М.: Металлургия, 1989.
9. Северденко В.П., Шепельский Н.В., Жилкин В.З. Обработка давлением гранул алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1980.
10. Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулированные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1981.
11. Фигуровский Д.К., Первухин М.В., Романова Е.В. Структурные особенности сплава 1417М системы Al—Se, полученного с использованием электромагнитного воздействия в процессе кристаллизации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 4. С. 19—22.
12. Пат. 2344187 (РФ). Алюминиевый сплав / Н.С. Куприянов, Н.Д. Шанин, В.Н. Федоров. 2009.
13. Пат. 2458170 (РФ). Алюминиевый сплав / В.Н. Баранов, В.С. Биронт, Р.И. Галиев и др. 2012.
14. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М.: МАКС Пресс, 2005.
15. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Ворошилов Д.С. и др. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al—РЗМ, полученных совмещенными методами литья и обработки давлением // Вест. МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 2. С. 23—28.