

www.rudmet.ru

ISSN 0372-2929

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1926 г.  
(№ 921)

9. 2019



ИНСТИТУТУ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

60 ЛЕТ

Реклама





**В. Н. Баранов,**  
директор ИЦМиМ,  
канд. техн наук, доцент

## Уважаемые читатели!

В текущем году исполняется 60 лет с первого выпуска металлургов на Красноярской земле.

Институт цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) является правопреемником и хранителем знаний, традиций Красноярского института цветных металлов им. М. И. Калинина, образованного в далеком 1958 г. Сегодня ИЦМиМ ведет подготовку высококвалифицированных кадров для нужд крупных градообразующих металлургических предприятий России и дальнего зарубежья, таких как ОК РУСАЛ, ПАО «Полюс», ОАО «Красцветмет», ОАО «Красмаш» и др. Ежегодно в стенах института проходят обучение более тысячи студентов очного и заочного отделений по направлениям подготовки: материаловедение, автоматизация технологических процессов и производств, химия, техносферная безопасность.

ИЦМиМ развивается и как уникальный научный центр. Здесь ведут научные исследования, охватывающие широкий спектр технологических проблем получения цветных металлов и их глубокой переработки для различных отраслей промышленности, производства продукции с добавленной стоимостью и инновационных цифровых продуктов. Ежегодно более ста статей сотрудников института публикуются в ведущих научно-технических журналах.

В юбилейный год я рад представить вашему вниманию выпуск журнала «Цветные металлы», посвященный результатам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в нашем институте.

*Желаю всем будущим авторам журнала новых научных и творческих успехов!*

**Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов»**

### УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

**Журнал выпускается при участии:** ПАО «ГМК «Норильский никель», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГБУК «Государственный Эрмитаж»;  
**при содействии:** ГП «Навоийский горно-металлургический комбинат», Научно-технического союза по горному делу, геологии и металлургии (Республика Болгария)

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Временно исполняющий обязанности главного редактора **А. В. Сысоев**  
Зам. главного редактора **А. Г. Воробьев**

**З. С. Абишева, Р. Х. Акчурин, М. В. Астахов** (редактор раздела «Наноструктурированные металлы и материалы»), **В. Ю. Бажин, Н. А. Белов** (редактор разделов «Металлообработка», «Материаловедение»), **В. А. Бочаров** (редактор раздела «Обогащение»), **Г. Ю. Боярко, В. Н. Бричкин, В. А. Брюквин, Г. М. Вольдман** (редактор раздела «Редкие металлы, полупроводники»), **Н. В. Воробьев-Десятовский, В. В. Геневски, Л. А. Глазунов, В. Б. Деев, В. А. Дмитриев, А. М. Дриц, А. В. Зиновьев, В. А. Игнаткина, М. Г. Исаенкова, В. С. Кальченко, С. С. Киров, Б. Г. Киселёв, П. А. Козлов, С. И. Корнеев** (редактор раздела «Экономика и управление производством»), **Б. А. Котляр, Ю. А. Котляр, В. А. Крюковский** (редактор раздела «Легкие металлы, углеродные материалы»), **Ф. Д. Ларичкин, А. Б. Лебедев, Е. А. Левашов** (редактор раздела «Композиционные материалы и многофункциональные покрытия»), **Ю. В. Левинский, Г. С. Макаров, Н. Е. Мальцев** (редактор раздела «Автоматизация»), **Ю. Н. Мансуров, М. А. Меретуков, А. М. Мицик, В. И. Москвитин, С. С. Набойченко, А. И. Николаев, В. В. Пронников, А. М. Птицын, В. К. Румянцев, А. Г. Рыжов, Ф. М. Сафин, А. Н. Селезнёв, Е. Н. Селиванов, А. В. Сулицин, А. В. Тарасов, А. Н. Фёдоров, Л. Ш. Цемехман, Л. Б. Цымбулов** (редактор раздела «Тяжелые цветные металлы»), **И. И. Чернов, М. Р. Шапировский, Н. В. Шаркина** (редакционный координатор), **В. И. Щёголев**.  
Зарубежные члены редколлегии: **Ж. Баатархуу** (Монголия), **В. В. Геневски** (Болгария), **Д. Дрейсингер** (Канада), **Е. Жак** (Австралия), **К. Кнуутила** (Финляндия), **Б. Фридрих** (Германия).

### РЕДАКЦИЯ:

зам. главного редактора **А. Г. Воробьев**; редакционный координатор **Н. В. Шаркина**;  
выпускающий редактор **А. Ю. Слепцова**; редактор **Г. Е. Форысенкова**; мл. редактор **П. А. Володина**;  
корректор **Ю. И. Королёва**;  
ответственная за предпечатную подготовку издания **О. Ю. Жукова**.

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»  
Адрес издателя: 119049, Москва, а/я № 71

Адрес редакции: Москва, Ленинский просп., д. 6,  
стр. 2, НИТУ «МИСиС», комн. 624  
Почтовый адрес: 119049, Москва, а/я № 71  
Тел./факс: (495) 955-01-75; моб.: 8-926-504-89-75  
Эл. почта: tsvetmet@rudmet.ru; интернет: www.rudmet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) (Свидетельство ПИ № ФС77-69818 от 29.05.2017 г.).  
Товарный знак и название «Цветные металлы» являются исключительной собственностью Издательского дома «Руда и Металлы».

Материалы, отмеченные «Реклама», публикуются на правах рекламы.

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель.

Все публикуемые материалы научно-технического характера проходят обязательную стадию рецензирования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор.

За сроки размещения опубликованных статей в базе данных Scopus редакция ответственности не несет.

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведение материалов, публикуемых в журнале, возможна только с письменного разрешения редакции.

При перепечатке ссылка на журнал «Цветные металлы» обязательна.

Отпечатано в типографии «Печатных дел мастер»  
Адрес типографии: 109518, Москва, 1-й Гайворонский проезд, д. 4.

Подписано в печать с оригинал-макета 01.10.2019.  
Формат 60x90 1/8. Печ. л. 11. Бумага офсетная.  
Печать офсетная.  
Тираж 1500 экз. Цена свободная.  
Дата выхода из печати 08.10.2019.

ISSN 0372-2929



9 770372 292006 >

# Содержание

---

## ИНСТИТУТУ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ — 60 ЛЕТ

**Довженко Н. Н., Гильманшина Т. Р.** Сибирская кузница кадров для цветной металлургии . . . . . 4

### Экономика и управление производством

**Вострикова Н. М., Безрукова Н. П.** Фундаментальная химическая подготовка как этап профессиональной подготовки бакалавров-металлургов . . . . . 9

### Тяжелые цветные металлы

**Сайкова С. В., Пантелеева М. В., Сайкова Д. И.** Катионообменная переработка растворов автоклавного вскрытия окисленных никелевых руд Буруктальского месторождения . . . . . 16

### Благородные металлы и их сплавы

**Рюмин А. И., Белоусов О. В., Соркинова Г. А., Сиротина Д. Ю.** Соосаждение меди в соль транс-дихлордиаминпалладия . . . . . 22

**Сиротина Д. Ю., Павлова Е. И., Брагин В. И., Белоусова Н. В.** Исследование процесса восстановления палладия параформальдегидом . . . . . 27

### Легкие металлы, углеродные материалы

**Михалев Ю. Г., Жаринова Н. Ю.** Режимы массопереноса при поляризации жидкого металлического электрода в расплавленных солях и выход по току . . . . . 32

**Финин Д. В., Куранов А. В., Ковтун О. Н., Колмакова Л. П.** Опыт использования бурых углей при спекании нефелино-известково-содовой шихты во вращающихся печах применительно к условиям АО «РУСАЛ Ачинск» . . . . . 36

**Ясинский А. С., Падамата С. К., Поляков П. В., Виноградов О. О.** Анодный процесс на алюминиевой бронзе в низкотемпературных криолитоглиноземных расплавах и суспензиях . . . . . 42

**Пискажова Т. В., Шайдулин Е. Р., Донцова Т. В., Авдеев Ю. О.** Управление тепловым балансом алюминиевых электролизеров . . . . . 50

### Автоматизация, аналитический контроль

**Якимов И. С., Безрукова О. Е., Дубинин П. С., Шиманский А. Ф.** Рентгеновский технологический контроль на предприятиях горно-металлургического комплекса цветной металлургии . . . . . 56

### Металлообработка

**Сидельников С. Б., Ворошилов Д. С., Первухин М. В., Мотков М. М.** Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al – PЗМ с применением совмещенной обработки . . . . . 63

**Веретнова Т. А., Царенко А. А., Веретнов А. Г., Шестаков И. Я.** Повышение эффективности электроконтактной резки металла путем применения системы управления . . . . . 69

**Ильин А. А., Солдатов С. В., Белоусова Н. В.** Снижение количества усадочных дефектов при литье чушки из алюминиевых сплавов с использованием компьютерного моделирования . . . . . 76

**Довженко Н. Н., Руциц С. В., Довженко И. Н., Юрьев П. О.** Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава P-1580, экономнолегированного скандием, при горячей деформации . . . . . 80

### Наши юбиляры

**Сентдьерди Гезе** — 80 лет . . . . . 88

**Сиразутдинову Геннадию Абдулловичу** — 80 лет . . . . . 87

---

*Журнал включен в Международные базы данных Scopus (2-й квартиль, 2018), а также Chemical Abstracts Service*

---

*Журнал по решению ВАК Минобразования РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по разработке месторождений твердых полезных ископаемых, по металлургии, по экономике, по химии.*

---

*Статьи всех авторов, в том числе аспирантов, публикуются в порядке общей очереди бесплатно (за исключением статей рекламного характера).*

---

# Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al – PЗМ с применением совмещенной обработки

УДК 621.777



**С. Б. Сидельников**,  
докт. техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой обработки металлов  
давлением Института цветных  
металлов и материаловедения



**М. В. Первухин**,  
докт. техн. наук, доцент,  
профессор кафедры электротехнологии и электроники  
Политехнического института



**Д. С. Ворошилов**,  
канд. техн. наук, доцент кафедр  
обработки металлов давлением  
Института цветных металлов и  
материаловедения,  
эл. почта: sibdrug@mail.ru



**М. М. Мотков**,  
аспирант кафедры литейного  
производства Института  
цветных металлов и мате-  
риаловедения

Сибирский федеральный университет,  
Красноярск, Россия

## Введение

Одним из перспективных направлений развития глубокой переработки алюминия является получение длинномерных деформированных полуфабрикатов небольшого поперечного сечения в виде прутков, катанки и проволоки из технического алюминия и его сплавов. На смену традиционным технологиям их изготовления методами прессования литых заготовок и последующего волочения все чаще приходят непрерывные методы прессования (Conform, СПП) и совмещенной обработки (литье-прокатка, «Кастекс», совмещенное литье и прокатка-прессование, бесслитковая прокатка-прессование) [1–3]. Разработкой одного из таких научных направлений, связанного с созданием технологий получения проволоки электротехнического назначения из алюминиевых сплавов различных систем легирования совмещенными методами обработки, занимаются ученые кафедры обработки металлов давлением Института цветных металлов Сибирского федерального университета (СФУ). Ими предложены и запатентованы новые устройства и способы совме-

Представлены результаты экспериментальных исследований технологии производства проволоки электротехнического назначения из алюминиевого сплава 01417 с содержанием редкоземельных металлов (PЗМ) в диапазоне 7–9 %. В качестве исходной использовали заготовку диаметром 12 мм, полученную методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Основными технологическими переделами являлись горячая деформация этой заготовки методом совмещенной прокатки-прессования (СПП) с целью получения прутка диаметром 5 мм и холодная деформация с использованием сортовой прокатки и волочения для получения проволоки диаметром 0,5 мм. Описаны режимы деформации, методика проведения экспериментов и оборудование для реализации предложенной технологии. На всех этапах технологии отобраны образцы и проведены исследования механических и электрофизических свойств полученных деформированных полуфабрикатов (временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и удельного электрического сопротивления). Установлено, что пластические свойства горячепрессованных прутков, полученных методом СПП, позволяют проводить холодную деформацию с использованием только одного промежуточного отжига. Изучено влияние различных режимов термообработки на механические и электрофизические свойства проволоки диаметром 0,5 мм. В ходе анализа экспериментальных данных было установлено, что максимальной пластичностью (временное сопротивление разрыву 137 МПа и относительное удлинение 19,1 %) для дальнейшего волочения и минимальным значением удельного электрического сопротивления ( $0,02902 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ) обладает проволока диаметром 0,5 мм, полученная по технологии ЭМК+СПП с последующей сортовой прокаткой и волочением, отожженная при температуре  $500^\circ\text{C}$  и времени выдержки 1 ч. Разработанные режимы деформационной и термической обработки позволяют достичь для проволоки из сплава 01417 требуемых значений механических свойств и электропроводности в соответствии с ТУ 1-809-1038–2018.

**Ключевые слова:** алюминий, редкоземельные металлы, пруток, проволока, механические свойства, электросопротивление, совмещенная прокатка-прессование, электромагнитный кристаллизатор, волочение, сортовая прокатка.

**DOI:** 10.17580/tsm.2019.09.10

щенной обработки для получения такой продукции, при этом трудоемкость и энергозатраты на ее изготовление снижаются в несколько раз [2, 3].

В последнее время возникла острая потребность в электропроводниках для летательных аппаратов, работающих при повышенных температурах (до  $250^\circ\text{C}$ ), из сплавов алюминия с PЗМ, обладающих повышенными прочностными свойствами и термостойкостью [4–12]. Актуальность этих исследований подтверждает то, что в 2010–2012 гг. в рамках про-

екта, соответствующего Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства», а также согласно договору Минобрнауки России и ОК «РУСАЛ» № 13.G25.31.0083 «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки» о создании высокотехнологического производства учеными СФУ совместно с сотрудниками ОК «РУСАЛ» был выполнен комплекс экспериментов. В результате создана и в настоящее время в промышленном режиме эксплуатируется установка совмещенной обработки СЛИПП-4 на Иркутском алюминиевом заводе.

Анализ научно-технической литературы показал, что для производства проволоки из сплава 01417 применяли многоступенчатую технологию, включающую 17 технологических переделов, в том числе литье гранул, дегазацию, спекание гранул, прессование и последующее волочение до заданного размера с промежуточными отжигами. Это приводило к высокой себестоимости этих полуфабрикатов, обусловленной значительной трудоемкостью производства и большими энергозатратами. Авторами предложена технология производства проволоки из сплавов системы Al – PЗМ, включающая получение литой заготовки в ЭМК и ее дальнейшую обработку с помощью СПП [12].

Согласно ТУ 1-809-1038–2018 [13], электротехническая проволока из сплава 01417 должна обладать свойствами, приведенными в табл. 1.

Целью работы, таким образом, является получение проволоки из сплава 01417 с требуемым уровнем свойств (см. табл. 1) и исследование влияния режимов обработки на механические свойства и электрическое сопротивление деформированных полуфабрикатов.

### Материалы и методика проведения экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования использовали непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм из сплава 01417, полученную методом литья в ЭМК [12]. Химический состав сплава приведен в табл. 2.

Для отработки изучаемых режимов деформации провели экспериментальные исследования на установке СПП-200, изготовленной на базе прокатного

Таблица 1  
Свойства проволоки из сплава 01417 по ТУ 1-809-1038–2018

Диаметр проволоки, мм	Состояние материала	Механические свойства на растяжение		Электро-сопротивление $\rho$ при 20 °С, Ом·мм <sup>2</sup> /м
		временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	относительное удлинение $\delta$ , %	
		не менее		не более
0,10–0,26	Отожженное	140,0	5	0,03200
	Нагартованное	196,0	Не определяют	
0,30–2,0	Отожженное	142,5	8	
	Нагартованное	196,0	Не определяют	

Таблица 2  
Химический состав сплава 01417

Объект исследования	Состав, % (мас.)						
	Al	Fe	Si	Ce	La	Pr	Nd
Пруток литой 01417 диаметром 12 мм	Основа	0,22	0,10	4,58	2,48	0,1	<0,1
Требования ТУ 1-809-1038–2018 [13]	Сумма (Ce + La + PЗМ) 7–9						

стана ДУО 200 по ранее предложенной методике [2, 14]. Температура нагрева заготовки 550 °С, инструмент подогревали до 100 °С. Скорость вращения валков составляла 4 и 8 мин<sup>-1</sup>. Диаметр получаемого прутка 5 мм (при этом коэффициент вытяжки при прессовании был равен 10).

На следующем этапе из полученного методом СПП прутка получали проволоку диаметром 0,5 мм по двум технологиям:

1) волочение до достижения диаметра 2,48 мм → промежуточный отжиг 500 °С, 1 ч → волочение до достижения диаметра 0,5 мм;

2) сортовая прокатка до достижения диаметра 2,2 мм → промежуточный отжиг 500 °С, 1 ч → сортовая прокатка до достижения диаметра 1,0 мм → волочение до достижения диаметра 0,5 мм.

После деформации проволоку, полученную по двум технологиям, отжигали по следующим режимам:

– температура отжига 350 °С, время выдержки 1 ч (режим № 1);

– температура отжига 400 °С, время выдержки 1 ч (режим № 2);

– температура отжига 450 °С, время выдержки 1 ч (режим № 3);

– температура отжига 500 °С, время выдержки 1 ч (режим № 4).

Механические свойства определяли с применением оборудования Walter+Bai AG LFM 400 kN и LFM 20 kN («Walter + Bai AG», Швейцария) в соответствии с ГОСТ 1497–84 [15] для прутков и ГОСТ 10446–80 [16] для проволоки.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  измеряли у образцов длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229–76 [17].

**Результаты исследований и их анализ**

Ранее проведенные исследования по получению непрерывнолитой заготовки в ЭМК [12] показали, что структура металла и уровень свойств зависят от диаметра слитков и скорости их получения. Было установлено также, что уменьшение диаметра непрерывнолитой заготовки и увеличение скорости литья приводят к улучшению структуры металла и повышению механических свойств. Анализ пластических свойств металла (табл. 3) показал,

что для дальнейшей обработки давлением целесообразно использовать в качестве исходной непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм, полученную в ЭМК.

Анализ микроструктуры металла (рис. 1) показал, что литые прутки при таком же сложном химическом составе, как и кокильная отливка, отличаются минимальным дендритным параметром, который сопоставим с размером дендритных ячеек в гранулах (6–12 мкм) и тонкими дисперсными выделениями частиц неравновесных фаз.

Таблица 3  
**Механические свойства непрерывнолитых заготовок из сплава 01417**

Диаметр слитка, мм	Параметр	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %
17		205	9,2	10,2
12		159	23	28
10		212	5,6	6,2
5		236	4,7	5,8

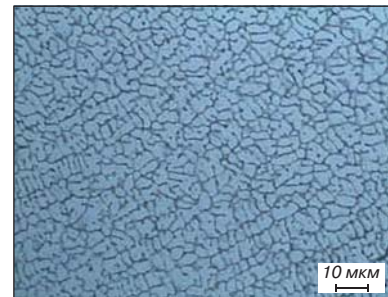


Рис. 1. Микроструктура непрерывнолитой заготовки, полученной в ЭМК,  $\times 200$

Таблица 4  
**Механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм после отжигов по четырем режимам**

Размер полуфабриката (мм) и состояние	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Удельное электросопротивление $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
СПП, $T = 550^\circ\text{C}$ , 4 мин <sup>-1</sup> , волочение (№ 1)			
Диаметр 0,5 мм, нагартованное	250	1,3	0,03183
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 350 °С, 1 ч	152	13,0	0,02924
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 400 °С, 1 ч	144	14,3	0,02931
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 450 °С, 1 ч	142	12,9	0,02923
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 500 °С, 1 ч	142	16,3	0,02914
СПП, $T = 550^\circ\text{C}$ , 4 мин <sup>-1</sup> , сортовая прокатка + волочение (№ 2)			
Диаметр 0,5 мм, нагартованное	250	1,1	0,03381
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 350 °С, 1 ч	155	13,8	0,02996
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 400 °С, 1 ч	148	18,0	0,02937
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 450 °С, 1 ч	146	12,7	0,02919
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 500 °С, 1 ч	137	19,1	0,02902
СПП, $T = 550^\circ\text{C}$ , 8 мин <sup>-1</sup> , волочение (№ 3)			
Диаметр 0,5 мм, нагартованное	209	1,1	0,03093
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 350 °С, 1 ч	136	13,5	0,03054
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 400 °С, 1 ч	129	20,1	0,03018
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 450 °С, 1 ч	123	23,3	0,02947
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 500 °С, 1 ч	120	28,8	0,02911
СПП, $T = 550^\circ\text{C}$ , 8 мин <sup>-1</sup> , сортовая прокатка + волочение (№ 4)			
Диаметр 0,5 мм, нагартованное	221	1,4	0,03173
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 350 °С, 1 ч	139	18,5	0,02949
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 400 °С, 1 ч	133	19,5	0,0294
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 450 °С, 1 ч	129	23,4	0,02924
Диаметр 0,5 мм, отожженное, 500 °С, 1 ч	128	23,6	0,02904
Требования ТУ 1-809-1038–2018 для проволоки диаметром 0,5 мм	Не менее 142,5	Не менее 8,0	Не более 0,03200

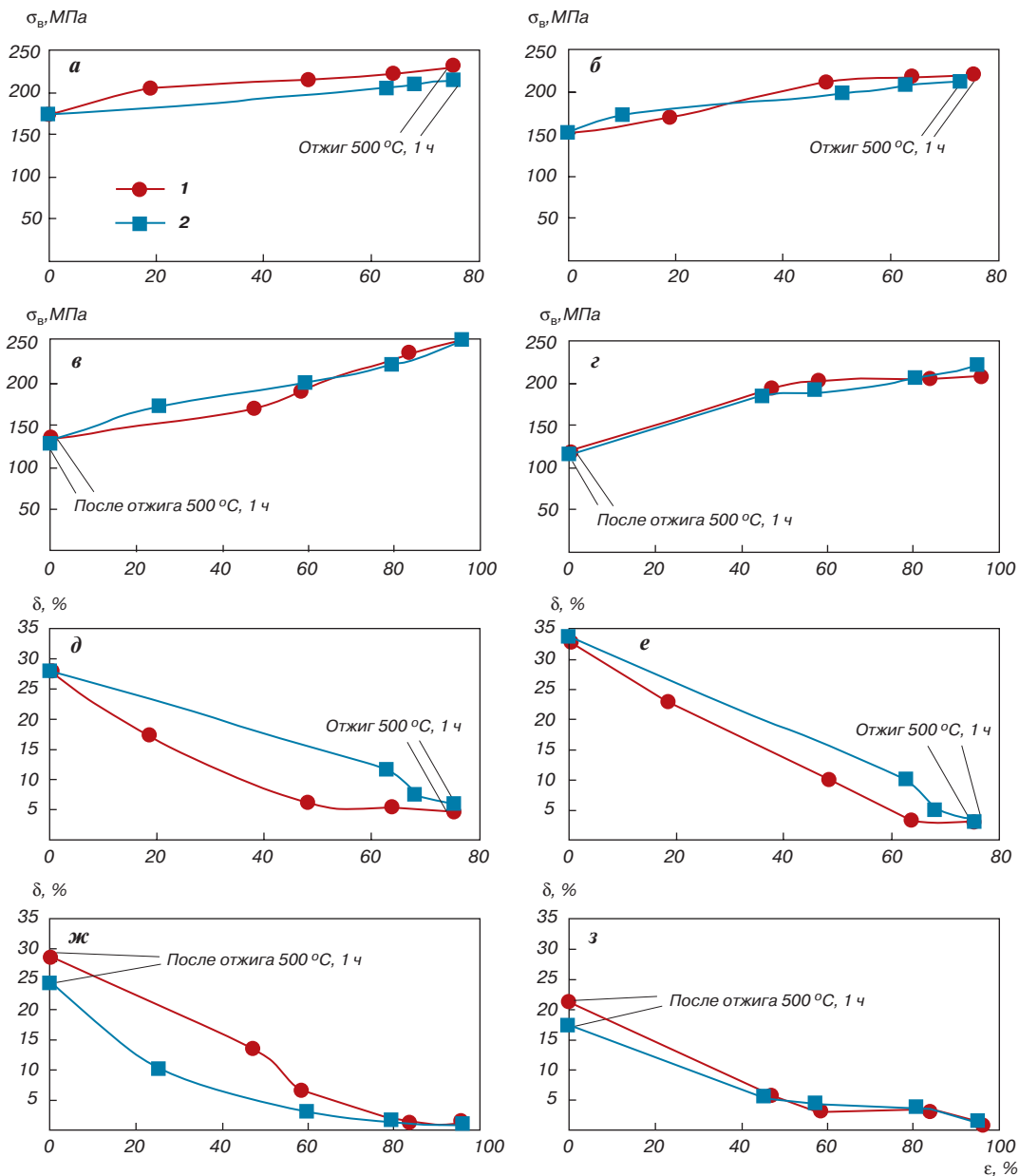
Таким образом, литье прутков диаметром 12 мм в ЭМК дает следующие преимущества: дендритный параметр слитка в 100 раз меньше, чем при литье в кристаллизатор скольжения, и сопоставим со структурой гранул; в слитках практически отсутствует дендритная ликвация, такой эффект не был достигнут даже при использовании гранульной технологии; без предварительной фильтрации и обработки расплава в готовых слитках отсутствуют неметаллические включения.

Значения механических свойств для прутков и проволоки из сплава 01417, полученных по разным технологиям, представлены на рис. 2.

Механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм после отжигов по четырем режимам представлены в табл. 4.

Проволока, полученная вторым способом из прутка после СПП со скоростью вращения валков  $4 \text{ мин}^{-1}$  (с применением сортовой прокатки и последующего волочения), после отжига по режимам № 1, 2 и 3 обладает требуемым уровнем свойств в соответствии с ТУ (см. табл. 4). Отжиг проволоки по режиму № 4 (температура  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч) приводит к снижению временного сопротивления разрыву до значения 137 МПа, что не соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018 [13], однако пластичность (19,1 %) позволяет вести дальнейшую обработку заготовки до диаметров порядка 0,1–0,2 мм.

Значения механических свойств проволоки из заготовки, полученной при скорости вращения валков  $8 \text{ мин}^{-1}$ , не отвечают требованиям ТУ 1-809-1038-2018



**Рис. 2.** Механические свойства деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных по разным технологиям (а, в, д, ж — скорость вращения валков при получении заготовки  $4 \text{ мин}^{-1}$ ; б, г, е, з — скорость вращения валков при получении заготовки  $8 \text{ мин}^{-1}$ ); а, б, в, г — временное сопротивление разрыву; д, е, ж, з — относительное удлинение; 1 — волочение; 2 — сортовая прокатка + волочение



[13] для диаметра 0,5 мм. При этом такую проволоку целесообразно использовать для получения проволоки более тонкого диаметра, вплоть до 0,1 мм.

Полученные значения электросопротивления для проволоки диаметром 0,5 мм соответствуют требованиям ТУ 1-809-1038–2018 [13] по всем режимам обработки в сочетании с отжигом.

### Заключение

Исследования влияния режимов деформационной и термической обработки на механические и электрофизические свойства проволоки электротехнического назначения из сплава 01417 системы Al–PЗМ позволили сделать следующие выводы:

– для реализации метода СПП целесообразно использовать полученную в ЭМК непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм, имеющую однородную по сечению и длине структуру и высокую пластичность;

– применение технологической схемы ЭМК+СПП с последующим волочением или сортовой прокаткой и волочением позволяет достичь требуемого уровня прочностных и пластических свойств, а также значительного электросопротивления, соответствующих требованиям ТУ 1-809-1038–2018;

– максимальной пластичностью, необходимой для получения проволоки диаметром до 0,1 мм, и минимальным значением удельного электрического сопротивления характеризуется проволока диаметром 0,5 мм, полученная методом ЭМК+СПП с последующими сортовой прокаткой и волочением, отожженная при температуре 500 °С с временем выдержки 1 ч;

– увеличение скорости деформации (скорости вращения валков) при СПП позволяет получить заготовку с более высокими пластическими характеристиками, что также обеспечивает лучшую пластичность у полученной проволоки диаметром 0,5 мм после отжига независимо от того, первым или вторым способом была получена проволока.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края и ООО «Научно-производственный центр Магнитной гидродинамики» в рамках научного проекта № 18-48-242021 «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al – PЗМ с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств».**

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Горохов Ю. В., Шеркунов В. Г., Довженко Н. Н.** и др. Основы проектирования процессов непрерывного прессования. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. — 224 с.
2. **Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н.** Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. — М. : МАКС Пресс, 2005. — 344 с.
3. **Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., Довженко Н. Н.** и др. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации-деформации и модифицировании алюминиевых сплавов. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. — 179 с.
4. **Горбунов Ю. А.** Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8, № 5. С. 636–645.
5. **Liao H., Wu Y., Wang Y.** Microstructure Evolution of Al – 0,35 % Si – 0,2 % Mg – 0,3 % Ce Alloy During Hot Extrusion and Its Contributions to Performances // Journal of Materials Engineering and Performance. 2015. No. 24 (6). P. 2503–2510.
6. **Liao H., Liu Y., Lü C., Wang Q.** Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys // Journal of Materials Research. 2017. No. 32 (3). P. 566–574.
7. **Shi Z. M., Gao K., Shi Y. T., Wang Y.** Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al – 1Fe binary alloys // Materials Science and Engineering: A. 2017. No. 632. P. 62–71.
8. **Zhang Meng, Wang Haoyu, Han Wei** et al. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al – Ce alloy from CeO<sub>2</sub> assisted by AlCl<sub>3</sub> in LiCl – KCl melts // Sci. China Chemistry. 2014. No. 57(11). P. 1477–1482.
9. **Судацова В. С., Шевченко М. А., Березуцкий В. В.** и др. Термодинамические свойства и фазовые равновесия в сплавах двойных систем Al(Si) – Ce // Журнал физической химии. 2014. Т. 88, № 5. С. 736–746.
10. **Mogucheva A., Zyabkin D., Kaibyshev R.** Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al – Ce alloy // Materials Science Forum. 2012. Vol. 706–709. P. 361–366.
11. **Belov N. A., Alabin A. N., Teleuova A. R.** Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 53, Iss. 9–10. P. 455–459.
12. **Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Ворошилов Д. С.** и др. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al – PЗМ, полученных совмещенными методами литья и обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2011. № 2 (34). С. 23–28.
13. **ТУ 1-809-63–2018.** Проволока электротехническая из алюминиевого сплава марки 01417. Технические условия. — Введ. 13.06.2048.
14. **Мотков М. М.** Разработка и исследование технологии производства проволоки из сплавов системы Al – PЗМ, полученной с применением совмещенных методов обработки // Матлы Междунар. студ. конф. «Перспектив Свободный-2019». — Красноярск, 22–26 апреля 2019 г. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019.
15. **ГОСТ 1497–84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение. — Введ. 01.01.1986.
16. **ГОСТ 10446–80.** Проволока. Метод испытания на растяжение. — Введ. 01.07.1982.
17. **ГОСТ 7229–76.** Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников. — Введ. 01.01.1978.

ЦМ

*Tsvetnye Metally. 2019. No. 9. pp. 63–68  
DOI: 10.17580/tsm.2019.09.10*

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING ELECTROTECHNICAL WIRE FROM ALLOYS OF THE Al-REM SYSTEM, OBTAINED WITH THE APPLICATION OF COMBINED MACHINING METHODS**

**Information about authors**

S. B. Sidelnikov, Head of the Department “Metal Forming”<sup>1</sup>  
D. S. Voroshilov, Associate Professor of the Department “Metal Forming”<sup>1</sup>  
M. V. Pervukhin, Professor of the Department of Electrotechnology and Electronics<sup>1</sup>  
M. M. Motkov, Post-Graduate Student<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Abstract**

The article presents the results of experimental studies of the technology for the production of electrical wire from aluminum alloy 01417 with a content of rare-earth metals (REM) in the range of 7–9%. As the source used the billet with a diameter of 12 mm, obtained by the method of casting in an electromagnetic mold (EMM). The main technological redistribution was hot deformation of this billet using the method of combined rolling-extruding (CRE) with the aim of obtaining a bar with a diameter of 5 mm, and cold deformation using bar rolling and drawing to obtain a wire with a diameter of 0.5 mm. Described deformation modes, methods of experiments and equipment for the implementation of the proposed technology. At all stages of the technology, samples were taken and studies of the mechanical and electrical properties of the obtained deformed semi-finished products (temporary tensile strength, relative elongation and electrical resistivity) were carried out. It was found that the plastic properties of hot-extruded rods obtained by the method of CRE, allow carrying out cold deformation using only one intermediate annealing. The effect of various heat treatment conditions on the mechanical and electrophysical properties of a wire with a diameter of 0.5 mm is studied. Analysis of experimental data revealed that the maximum ductility (temporary tensile strength of 137 MPa and an elongation of 19.1%) for further drawing and the minimum value of electrical resistivity (0.02902 Ohm·mm<sup>2</sup>/m) has a wire with a diameter of 0.5 mm, obtained by the EMM+CRE technology followed by bar rolling and drawing, annealed at a temperature of 500 °C and a holding time of 1 h. The developed modes of deformation and heat treatment allow to achieve the required values of mechanical properties and electrical conductivity for wire from alloy 01417 in accordance with the technical specifications 1-809-1038–2018.

**Key words:** aluminum, rare earth metals, rods, wires, mechanical properties, electrical resistance, combined rolling-pressing, electromagnetic mold, drawing, bar rolling.

**References**

1. Gorokhov Yu. V., Sherkunov V. G., Dovzhenko N. N. et al. Continuous pressing: Design basics. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyy universitet, 2013. 224 p.

2. Sidelnikov S. B., Dovzhenko N. N., Zagirov N. N. Combined techniques in non-ferrous metals and alloys processing. Moscow : MAKS Press, 2005. 344 p.  
3. Sidelnikov S. B., Lopatina E. S., Dovzhenko N. N. et al. The structure and properties of metal in rapid solidification/deformation and aluminium alloys inoculation. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyy universitet, 2015. 179 p.  
4. Gorbunov Yu. A. The role and prospects of rare earth metals in the development of physico-mechanical properties and applications of wrought aluminium alloys. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii.* 2015. Vol. 8, No. 5. pp. 636–645.  
5. Liao H., Wu Y., Wang Y. Microstructure Evolution of Al – 0,35% Si – 0,2% Mg – 0,3% Ce Alloy During Hot Extrusion and Its Contributions to Performances. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2015. Vol. 24, No. 6. pp. 2503–2510.  
6. Liao H., Liu Y., Li C., Wang Q. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys. *Journal of Materials Research.* 2017. Vol. 32, No. 3. pp. 566–574.  
7. Shi Z. M., Gao K., Shi Y. T., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al – 1Fe binary alloys. *Materials Science and Engineering: A.* 2017. No. 632. pp. 62–71.  
8. Zhang Meng, Wang Haoyu, Han Wei et al. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al – Ce alloy from CeO<sub>2</sub> assisted by AlCl<sub>3</sub> in LiCl – KCl melts. *Science China Chemistry.* 2014. Vol. 57, No. 11. pp. 1477–1482.  
9. Sudavtsova V. S., Shevchenko M. A., Berezutskiy V. V. et al. Thermodynamic properties and phase equilibria in Al(Si) – Ce binary alloys. *Zhurnal fizicheskoy khimii.* 2014. Vol. 88, No. 5. pp. 736–746.  
10. Mogucheva A., Zyabkin D., Kaibyshev R. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al – Ce alloy. *Materials Science Forum.* 2012. Vol. 706–709. pp. 361–366.  
11. Belov N. A., Alabin A. N., Teleuova A. R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires. *Metal Science and Heat Treatment.* 2012. Vol. 53, Iss. 9–10. pp. 455–459.  
12. Sidelnikov S. B., Dovzhenko N. N., Voroshilov D. S. et al. Understanding the structure of metal and analyzing the properties of Al – REM alloy specimens obtained through a combination of casting and forming techniques. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University.* 2011. No. 2 (34). pp. 23–28.  
13. TU 1-809-63–2018. Electrical wire made of 01417 grade aluminium alloy. Specification. Introduced: 13.06.2018.  
14. Motkov M. M. Developing and studying a process for producing Al-REM alloy wire through combined processing. *Proceedings of the International Student Conference “Svobodnyy Prospekt-2019”* (Krasnoyarsk, 22–26 April 2019). Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyy universitet, 2019.  
15. GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test. Introduced: 01.01.1986.  
16. GOST 10446–80. Wire. Tensile test method. Introduced: 01.07.1982.  
17. GOST 7229–76. Cables, wires and cords. Method of measuring electrical resistance of conductors. Introduced: 01.01.1978.

**И. И. Новиков, В. С. Золоторевский, В. К. Портной, Н. А. Белов, Д. В. Ливанов, С. В. Медведева, А. А. Аксёнов, Ю. В. Евсеев**

**Металловедение. Учебник. В 2 т.**

**Т. 1. Основы металловедения**

**Т. 2. Термическая обработка. Сплавы**

В учебнике изложены основы металловедения и термической обработки, особенности структуры и свойств промышленных сплавов и композиционных материалов на металлической основе.

В томе 1 даны представления о кристаллической структуре металлов и ее дефектах, методах структурного анализа, элементах теории фазовых превращений. Проанализированы фазовые диаграммы двойных и многокомпонентных систем, неравновесная кристаллизация, процессы деформации и разрушения, механические, физические и технологические свойства металлов и сплавов, их структура и свойства после обработки давлением.

Учебник рекомендован студентам и аспирантам, обучающимся по направлению «Металлургия», может служить учебным пособием для студентов, обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов».

2-е изд., испр.



Реклама

**По вопросам приобретения книги обращайтесь:  
119049, Москва, Ленинский просп., д. 6., стр. 2  
(НИТУ «МИСиС», А-корпус), 6-й этаж, офис 624.  
E-mail: books@rudmet.ru  
Тел.: (495) 955-01-75**