

www.rudmet.ru

ISSN 0372-2929

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1926 г.  
(№ 915)

3. 2019





## Уважаемые коллеги!

Цветные металлы остаются важнейшими материалами, используемыми в различных отраслях промышленности. Их мировое производство в основном неуклонно растет. В журнале «Цветные металлы» регулярно публикуются очень интересные материалы о выпуске цветных металлов, их стоимости на отечественных и зарубежных предприятиях. Хотелось бы увидеть и данные об их потреблении в различных странах, в том числе в России. Как обходится Россия минимальным потреблением никеля и кобальта? Максимальное производство никеля в СССР достигало более 300–350 тыс. т/год, причем объем продаж за рубеж был крайне ограничен. Производство кобальта при переработке кубинского и тувинского концентратов приближалось к 6000 т/год. Более

того, СССР закупал более чистый кобальт в Европе и странах Африки. Достаточно сказать, что небольшой Ленинградский завод турбинных лопаток потреблял 600–800 т/год кобальта.

В настоящем номере журнала три статьи посвящены различным вопросам металлургии тяжелых цветных металлов. В одной из них обсуждается переработка окисленных никелевых руд (ОНР) Буруктальского месторождения.

До недавнего времени на Урале работали три никелевых завода, перерабатывающих ОНР: Южуралникель, Уфалейникель и Режникель. Все они закрылись из-за убыточности производства вследствие низкого содержания никеля в рудах и использования устаревшей технологии, основанной на шахтной плавке.

Буруктальское месторождение является крупнейшим в России месторождением ОНР. Его руды характеризуются низким содержанием никеля (0,6–0,8 %) и повышенным — кобальта. Первые исследования в России были проведены в 1950-х гг. в институте «Гипроникель». Отрабатывались технологии, основанные на усовершенствованной шахтной плавке, кричном процессе, электроплавке на ферроникель с последующим рафинированием его в вертикальных кислородных конвертерах. На основе полученных результатов были выполнены проекты Побужского ферроникелевого завода и ферроникелевого завода в Косово. Первый завод по проекту перерабатывал собственную руду, содержащую менее 0,8 % Ni. Его эффективность обеспечивалась переработкой в конвертерах повышенных количеств железо-никелевой «вторички». В начале XXI в. собственная руда этого предприятия была заменена сначала на более богатую руду Юго-Восточной Азии, а затем на руду Гватемалы (которая является собственностью владельцев завода). В настоящее время завод выпускает рафинированный ферроникель с содержанием никеля 20 %. Завод в Косово был разрушен во время войны в Югославии, а через несколько лет восстановлен.

Буруктальский никелевый завод не был построен из-за низкого качества руды, высоких капитальных затрат и открытия богатых руд Талнахского и Октябрьского месторождений в Норильске.

Несмотря на значительный объем проведенных ранее исследований, работы по созданию эффективных пиро- и гидрометаллургических технологий переработки ОНР Урала должны быть продолжены и обеспечены государственным финансированием.

На отечественных предприятиях, перерабатывающих сульфидные медно-никелевые и медные концентраты, используют различные автогенные процессы. Для широкого круга читателей было бы весьма интересным выполнить и опубликовать технологическое и экономическое сравнение вариантов плавки в печи Ванюкова и взвешенной плавки (ПАО «ГМК «Норильский никель»), а также плавки в печах Ванюкова и Аусмелт (УГМК, РМК).

В Сибири построен и сдан в эксплуатацию новый Быстринский ГОК, где в результате обогащения руды получают железный и медный концентраты, которые направляют на зарубежные предприятия. Золотосодержащий концентрат поступает на металлургическое производство Норильска.

В заключение хотелось бы указать на два месторождения, которые планируется ввести в эксплуатацию, — Удоканское медное и Воронежское медно-никелевое. Информация о них представит несомненный интерес для широкого круга читателей.

*Л. Ш. Цемехман,  
советник генерального директора института «Гипроникель»,  
заслуженный деятель науки РФ,  
академик РАН, лауреат премии по экспериментальной физике  
им. академика Б. П. Константинова АН СССР, докт. техн. наук, профессор*

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Подписные индексы: 71060 (Роспечать)  
83869 (ОК «Пресса России»)

**3(915) • 2019**  
**март**

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

*Журнал основан в 1926 г.*

**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:

Главный редактор **Ю. А. Король**

Первый зам. 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 раздела «Металлообработка»), **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. Генеvски, Л. А. Глазунов, Ю. Ф. Гнедин, 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, Б. А. Котляр** (редактор раздела «Экономика и управление производством»), **Ю. А. Котляр, В. А. Крюковский** (редактор раздела «Легкие металлы, углеродные материалы»), **Ф. Д. Ларичкин, А. Б. Лебедь, 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, Е. Н. Селиванов, Л. С. Стрижко, 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. Генеvски** (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 **Е. Ю. Рахманова**; 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 рецензи-  
рования.

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 «Канцлер»  
Адрес типографии: 150044, Россия, Ярославль,  
ул. Полушкина роща, д. 16, стр. 66А,  
тел.: 8(4852)58-76-33

Подписано в печать с оригинал-макета 27.03.2019.  
Формат 60x90 1/8. Печ. л. 11. Бумага офсетная.  
Печать офсетная.  
Тираж 1500 экз. Цена свободная.  
Дата выхода из печати 02.04.2019.

ISSN 0372-2929



9 770372 292006 >

# Содержание

---

## Экономика и управление производством

<i>Международный обзор рынка цветных металлов</i> .....	4
---	---

## Обогащение

Каюмов А. А., Аксенова Д. Д., Белокрыс М. А., Малофеева П. Р. Влияние тиосульфата натрия на флотированность теннантита и пирита .....	7
---	---

## Тяжелые цветные металлы

Сосновский М. Г., Гуляев С. В., Зарков А. В. Возможный путь переработки никель-кобальтовых руд Буруктаьского месторождения на комбинате «Южуралникель» .....	21
Козлов П. А., Ходыко И. И., Порошин Е. А., Ивакин Д. А. Разработка технологии использования нефтекосса в вельц-процессе .....	28
Халезов Б. Д., Гаврилов А. С., Петрова С. А., Овчинникова Л. А. Извлечение никеля из растворов гидросульфидом натрия .....	33

## Легкие металлы, углеродные материалы

Апалькова Г. Д. Влияние структуры железоокисных нанодобавок на формирование свойств графита .....	39
---	----

## Материаловедение

Казаков А. А., Киселев Д. В., Кур А. А. Автоматизированная оценка неметаллических включений в алюминиевых сплавах по методике PoDFA с помощью анализа изображений .....	43
Дуюнова В. А., Козлов И. А., Кузнецова В. А., Козлова А. А. Влияние эксплуатационных нагревов на защитные свойства покрытий для магниевых сплавов МЛ10 .....	51
Саркисов С. С. Исследование влияния режимов окончательного отжига на потребительские свойства алюминиевой фольги для анодов высоковольтных электролитических конденсаторов .....	58

## Металлообработка

Яшин В. В., Рушиц С. В., Арышенский Е. В., Латушкин И. А. Реологические свойства деформируемых алюминиевых сплавов 01570 и AA5182 в условиях горячей деформации .....	64
Сосенушкин Е. Н., Кадымов В. А., Яновская Е. А., Гуреева Т. В. Механика выдавливания алюминиевого сплава при штамповке поковки с продольными ребрами .....	69
Тимофеев В. Н., Усынина Г. П., Мотков М. М., Гудков И. С. Изготовление заклепочной проволоки из заготовки, полученной из сплава В65 методом электромагнитной кристаллизации .....	76

## Автоматизация

Тихонов В. А. К вопросу эксплуатации электрооборудования .....	83
--	----

## Из истории журнала

Изучение условий выщелачивания цинковых концентратов. Ф. М. Лоскутов, Р. Я. Подольская (Архивная статья 1948 г.) .....	15
--	----

## Наши юбиляры

К 70-летию Цоло Йотова Вутова .....	14
СИДЕЛЬНИКОВУ Сергею Борисовичу — 60 лет .....	27

## Хроника

Ф. Д. Ларичкину присуждена премия имени Н. В. Мельникова 2019 года .....	13
--	----

---

*Журнал включен в Международные базы данных Scopus (2-й квартиль, 2017),  
а также Chemical Abstracts Service*

---

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ (2017) без самоцитирования ..... **0,360**

---

*Журнал по решению ВАК Минобрнауки 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).*

---



# Изготовление заклепочной проволоки из заготовки, полученной из сплава В65 методом электромагнитной кристаллизации

УДК 669.71.055

**В. Н. Тимофеев**, директор<sup>1</sup>, заведующий кафедрой «Электротехнологии и электротехники»<sup>2</sup>

**Г. П. Усынина**, главный материаловед<sup>1</sup>

**М. М. Мотков**, начальник отдела непрерывного литья и пластической деформации<sup>1</sup>

**И. С. Гудков**, ведущий специалист отдела токов высокой частоты<sup>1</sup>, эл. почта: rdohead@mail.ru

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики», Красноярск, Россия.

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

Образцы, полученные по разработанной технологии непрерывного литья круглых слитков малого сечения, отличаются чистотой и дисперсностью структуры. В данной работе представлена схема производства заклепочной проволоки из алюминиевого сплава В65 с использованием литой длинномерной заготовки диаметром 9 мм, полученной методом электромагнитной кристаллизации (ЭМК). При воздействии на расплав высокочастотного электромагнитного поля в структуре полученных слитков отсутствуют шлаковые включения, оксидные пленки и другие литейные дефекты, свойственные традиционному литью; обеспечивается получение дисперсной структуры с размером дендритной ячейки ~3–6 мкм, который характерен для гранулируемых алюминиевых сплавов, полученных со скоростями охлаждения 103–104 °С/с.

Показано влияние на структуру металла обработки исходной чушки методом литья в ЭМК.

При сопоставлении с существующим классическим методом производства заклепочной проволоки из прессованной заготовки установлено, что новая технология литья в ЭМК позволяет повысить выход годного за счет получения проволоки без дефектов литейного и прессового происхождения, сократить энерго- и трудозатраты, увеличить производительность в результате уменьшения числа промежуточных отжигов при волочении проволоки. Показано влияние на структуру металла различных маршрутов волочения заготовки, полученной в ЭМК.

Приведены результаты исследования проволоки, полученной из гомогенизированной и негомогенизированной заготовок, исследовано влияние суммарной степени холодной деформации на размер зерна и механические свойства проволоки по новой технологии. Проведены промышленные испытания проволоки и выбран оптимальный технологический вариант, обеспечивающий получение требуемых показателей качества у заклепок авиационного назначения.

**Ключевые слова:** электромагнитная кристаллизация, высокочастотное электромагнитное поле, алюминиевые сплавы, гранулируемые сплавы, авиационные сплавы, сверхбыстрая кристаллизация, кристаллизация в электромагнитном поле, литая и прессованная заготовка, авиационные заклепки.

**DOI:** 10.17580/tsm.2019.03.11

## Введение

Проблема получения качественной проволоки под заклепки из алюминиевого сплава В65, который является основным заклепочным сплавом в авиационной промышленности, появилась десятки лет назад и до сих пор является актуальной.

Одной из наиболее важных характеристик проволоки для авиационных заклепок является технологическая пластичность при осадке (расклепываемость), которая во многом зависит от структуры заготовки металла, а также от его загрязненности неметаллическими и другими включениями. Недопустимыми являются такие дефекты, как литейные трещины, неслитины, скопления интерметаллидов, шлаковые и окисные включения, крупная пористость. Дефекты слитка приводят к появлению поверхностных и внутренних дефектов проволоки типа оксидных плен, закатов,

раковин. Дефекты, не выходящие на поверхность проволоки, ухудшают расклепываемость при испытаниях на осадку, поскольку инициируют появление трещин, снижая локальную пластичность проволоки [1–4].

В отличие от традиционной, технология литья непрерывным методом слитков малых диаметров в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), как показали проведенные исследования, исключает появление в исходной заготовке для волочения шлаковых включений, окисных плен, неслитин и др. Кроме того, данная технология обеспечивает получение в слитке дисперсной структуры [5–9].

Существующий процесс производства заклепочной проволоки через прессованный пруток является технологически многоступенчатым, длительным и энергозатратным. По традиционной технологии для получения проволоки из сплава В65 отливают слитки diam. 162 мм непрерывным методом в кри-

сталлизатор скольжения, затем их гомогенизируют по режиму 480–500 °С – 12 ч и обтачивают. Из гомогенизированных слитков прессуют прутки диам. 9 и 11 мм и сматывают в бухты. При использовании такой технологии выход годного незначительный, при этом образуется большое количество отходов как при литье слитков, так и при прессовании прутков. Предлагаемая технология с использованием литой заготовки диам. 9 мм, полученной отливкой в ЭМК, позволяет значительно увеличить выход годного при производстве заклепок. Кроме того, отсутствуют такие дефекты, как утяжины, пузыри и крупнокристаллический ободок, характерные для прессованной заготовки.

Целью данной работы являлась разработка технологии получения длинномерных слитков диам. 9 мм из сплава В65 методом литья в ЭМК и волочения из них заклепочной проволоки диаметром 2,6–4,0 мм.

### Методика исследования

Сплав В65 и отливка в виде чушки были изготовлены в ООО «К и К». Далее чушку расплавляли для получения слитков диам. 9 мм в ЭМК со скоростью 10–12 мм/с, которые затем были сматаны в бухту в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики».

Содержание основных легирующих компонентов (Cu, Mg, Mn) в чушке определяли методом химического анализа, а химический состав длинномерного слитка, отлитого в ЭМК, — спектральным методом на оптическом эмиссионном спектрометре Spectrolab – М9.

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе Neophot 21 с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличениях 100, 200 и 1000 крат.

Испытания на растяжение образцов с определением предела прочности, предела текучести и относительного удлинения проводили на универсальной испытательной машине WDW-20 усилием 2 т.

Твердость по Бринеллю определяли с использованием стального шарика диаметром 5 мм при нагрузке 250 кг по ГОСТ 9012–59 [10] на приборе НВ-3000В.

Промышленные испытания проволоки проведены в ООО «Авиасервис» в Нижнем Новгороде.

### Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав чушки, отлитой из сплава В65, соответствует ГОСТ 4784–97 [11], %: 4,26 Cu; 0,41 Mn;

0,21 Mg. Спектральный анализ образца слитка, отлитого в ЭМК, показал соответствие содержания основных компонентов и примесей требованиям стандарта и практически не отличается от данных, полученных при анализе чушки (табл. 1).

Исследования микроструктуры исходной чушки из сплава В65 показали наличие грубой усадочной и междендритной пористости в ее литниковой зоне (рис. 1, а, б).

Также в чушке заметна химическая микронеоднородность из-за дендритной ликвации (см. рис. 1, б, в).

Слиток, полученный отливкой в ЭМК, имел ровную, достаточно гладкую и матовую поверхность. На рис. 2 представлен внешний вид длинномерного слитка диам. 9 мм из сплава В65, предназначенного для последующего волочения заклепочной проволоки.

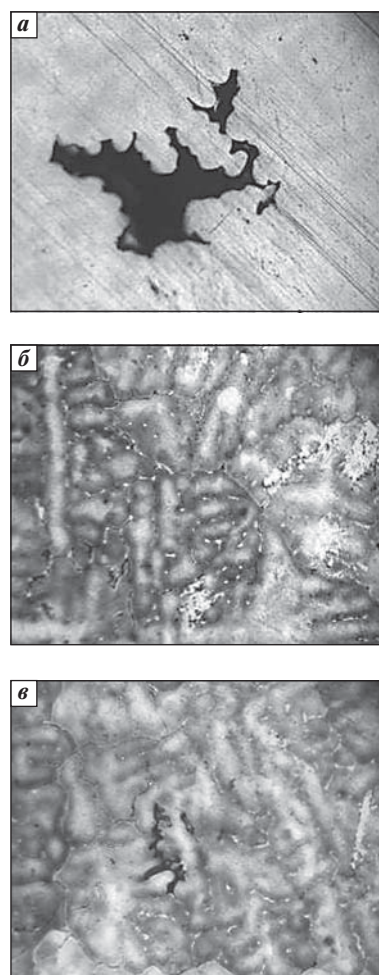


Рис. 1. Микроструктура чушки из сплава В65, ×200

Таблица 1  
Химический состав слитка сплава В65, отлитого в ЭМК, % (мас.)

Продукт	Состав, % (мас.)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Cr
Длинномерный слиток	0,08	0,085	4,24	0,405	0,210	0,0023	0,0058	0,012	0,0047
Сплав В65 (ГОСТ 4784–97)	0,25	0,2	3,9–4,5	0,3–0,5	0,15–0,30	0,1	0,1	–	–

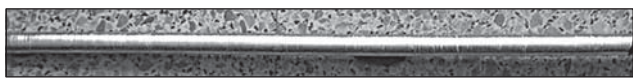


Рис. 2. Внешний вид длинномерного слитка диам. 9 мм из сплава В65, отлитого непрерывным методом в ЭМК

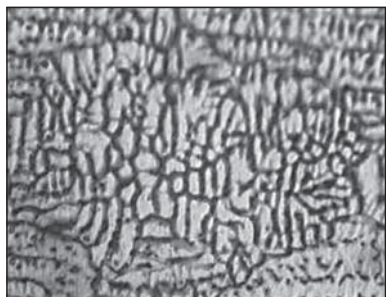


Рис. 3. Микроструктура длинномерного слитка диам. 9 мм из сплава В65, отлитого в ЭМК,  $\times 1000$

Микроструктурные исследования длинномерного слитка из сплава В65 показали, что, как и в ранее исследуемых слитках электромагнитного литья из сплавов 01417, АМГ6 и др. [12–14], размер дендритной ячейки составил 3–6 мкм (рис. 3). Это свидетельствует о том, что кристаллизация осуществлялась с высокой скоростью охлаждения  $10^3\text{--}10^4$  °С/с и соответствует скоростям охлаждения гранул диаметром 1–4 мм. В структуре исследуемых длинномерных слитков не обнаружено оксидных плен и других неметаллических включений.

Результаты испытаний механических свойств слитка, полученного ЭМК, показали, что временное сопротивление разрыву составило  $\sigma_B = 275\text{--}289$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 147\text{--}151$  МПа, относительное удлинение  $\sigma = 22,8\text{--}24,2$  % (табл. 2).

Прессованный пруток имеет более высокие механические свойства ( $\sigma_B = 340$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 205\text{--}210$  МПа,  $\sigma = 30,15\text{--}30,25$  %), что объясняется положительным влиянием пластической деформации.

Известно, что для повышения пластичности материала, определяемой при испытаниях на расклепываемость, рекомендуется ряд технологических приемов, в частности использование полной гомогенизации слитков и высокой (не менее 50 %) степени холодной деформации между последним отжигом и нагревом под закалку, что приводит к формированию в проволоке мелкозернистой структуры со средней площадью зерна порядка  $400\text{ мкм}^2$  [15–17].

Таблица 2  
Механические свойства заготовки, отлитой в ЭМК, и прессованной заготовки

Полуфабрикат	Механические свойства		
	предел прочности, МПа	предел текучести, МПа	относительное удлинение, %
Слиток диам. 9 мм, отлитый в ЭМК	275	151	24,2
	280	147	23,6
	275	147	22,8
Прессованный пруток диам. 9 мм	340	205	30,1
	340	210	30,2
	340	205	30,2

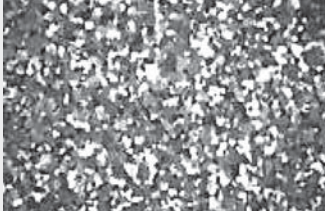
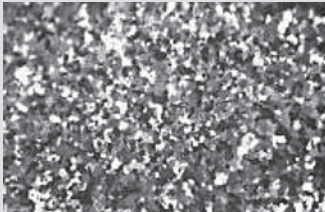
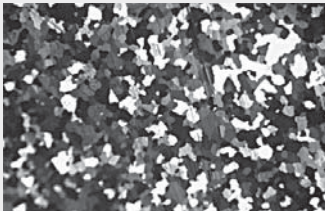
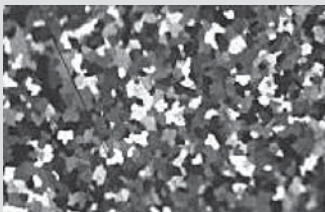
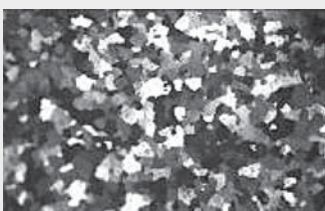

Таблица 3  
Механические свойства проволоки под заклепку из сплава В65, полученной из длинномерного слитка, отлитого в ЭМК, в зависимости от технологии ее получения

Технологический вариант изготовления проволоки диам. 4 мм	Маршрут волочения	Суммарная степень холодной деформации, %	Механические свойства			
			$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	твердость НВ, МПа
№ 1: гомогенизация заготовки	Заготовка диам. 9 мм → гомогенизация (480 °С — 8 ч) → → диам. 7,5 мм → отжиг (380 °С — 90 мин), охлаждение с печью до 260 °С → диам. 6,35 мм → диам. 5,65 мм → → диам. 4 мм	71,5 (с диам. 7,5 до диам. 4 мм)	404	214	22,1	1009,4
№ 2: гомогенизация заготовки	Заготовка диам. 9 мм → гомогенизация (480 °С — 8 ч) → → диам. 7,5 мм → диам. 6,35 мм → отжиг (380 °С — 90 мин), охлаждение с печью до 260 °С → диам. 5,65 мм → → диам. 4 мм	60,3 (с диам. 6,35 до диам. 4 мм)	384	198	19,0	935,9
№ 3: гомогенизация заготовки	Заготовка диам. 9 мм → гомогенизация (480 °С — 8 ч) → → диам. 7,5 мм → диам. 6,35 мм → диам. 5,65 мм → отжиг (380 °С — 90 мин), охлаждение с печью до 260 °С → → диам. 4 мм	49,9 (с диам. 5,65 до диам. 4 мм)	390	207	21,7	935,9
№ 4: без гомогенизации заготовки	Заготовка диам. 9 мм → диам. 7,5 мм → отжиг (380 °С — 90 мин), охлаждение с печью до 260 °С → → диам. 6,35 мм → диам. 5,65 мм → диам. 4 мм	71,5 (с диам. 7,5 до диам. 4 мм)	378	187	22,1	935,9
№ 5: без гомогенизации заготовки	Заготовка диам. 9 мм → диам. 7,5 мм → диам. 6,35 мм → → отжиг (380 °С — 90 мин), охлаждение с печью до 260 °С → → диам. 5,65 мм → диам. 4 мм	60,3 (с диам. 6,35 до диам. 4 мм)	369	190	19,0	935,9
№ 6: без гомогенизации заготовки	Заготовка диам. 9 мм → диам. 7,5 мм → диам. 6,35 мм → → диам. 5,65 мм → отжиг (380 °С — 90 мин), охлаждение с печью до 260 °С → диам. 4 мм	50,0 (с диам. 5,65 до диам. 4 мм)	367	183	20,7	935,9

При разработке новой технологии производства проволоки под заклепку было опробовано изготовление ее из гомогенизированного (480 °С, 8 ч) и негомогенизированного слитков с разной степенью деформации после последнего отжига перед закалкой (табл. 3). Промежуточный отжиг по режиму 380 °С – 90 мин выбран

на предприятии волочения как самый оптимальный из опыта работы с данным сплавом.

Была поставлена задача исследовать влияние гомогенизации на размер рекристаллизованного зерна и механические свойства проволоки диам. 4 мм после закалки и старения, оценить у заказчика значения

Таблица 4 Размер рекристаллизованного зерна в проволоке диам. 4 мм сплава В65, полученной по разным технологическим вариантам (см. табл. 3)			
Технологический вариант изготовления проволоки диам. 4 мм, суммарная степень деформации	Микроструктура в поляризованном свете, ×100	Средний размер зерна, мкм	Балл зерна по ГОСТ 21073.1–75 [18]
№ 1: гомогенизация заготовки, 71,5 %		19	8
№ 2: гомогенизация заготовки, 60,3 %		24	8
№ 3: гомогенизация заготовки, 50 %		39	6
№ 4: без гомогенизации заготовки, 71,5 %		40	6
№ 5: без гомогенизации заготовки, 60,3 %		48	6
№ 6: без гомогенизации заготовки, 50 %		80	4–5



основной прочностной характеристики — сопротивления срезу ( $\tau_{ср}$ ) и технологической пластичности при осадке (расклепываемости).

Анализ механических свойств показал, что гомогенизация заготовок повышает прочностные свойства проволоки из сплава В65. Причем максимальный прирост свойств получен при суммарной степени холодной деформации 71,5 % (см. табл. 3).

Известно, что проволока с высокой пластичностью при осадке имеет мелкозернистую структуру. В частности, согласно требованиям заказчика (ООО «Авиасервис»), размер рекристаллизованного зерна в закаленной проволоке должен быть не более 40 мкм. Крупнозернистая структура обуславливает образование трещин в образцах при испытаниях на осадку.

Для формирования в закаленной проволоке мелкозернистой структуры необходимо обеспечить высокую степень деформации после последнего отжига.

Определение размера зерна в проволоке диам. 4 мм, полученной по различным технологическим вариантам, показало, что оно заметно измельчается при использовании гомогенизированной заготовки диам. 12 мм и волочения со степенью деформации после последнего отжига 50–71,5 %. Причем размер зерна закономерно уменьшается от 39 до 19 мкм с повышением степени деформации от 50 до 71,5 % (табл. 4).

При использовании негомогенизированной заготовки происходит заметное увеличение размера ре-

кристаллизованного зерна в проволоке (до 80 мкм) (см. табл. 4).

Сравнение маршрутов волочения проволоки диаметром 4 мм из сплава В65 показало, что количество промежуточных отжигов при волочении проволоки из литой заготовки, отлитой в ЭМК, в 4 раза меньше, чем из прессованной заготовки.

Маршрут волочения проволоки диам. 4 мм из литой в ЭМК и прессованной заготовки:

заготовка после ЭМК: 9 мм → отжиг (400 °С — 6 ч) → 7,6 мм → 7 мм → 6 мм → 5,5 → 4,9 → 4,35 → 4,0;

прессованная заготовка: 10 мм → отжиг (400 °С — 6 ч) → 9 мм → отжиг (400 °С — 6 ч) → 8 → 7 → отжиг (400 °С — 6 ч) → 6 → отжиг (400 °С — 6 ч) → 5,5 → 5 → 4,35 → 4,0.

Промышленные испытания проволоки диам. 4 мм из сплава В65, полученной по новой технологии, и заклепок по ОСТ 1 34076–85 [19] в ООО «Авиасервис» показали, что проволока, изготовленная из гомогенизированных заготовок со степенью деформации после последнего отжига 50 %, и полученные из нее заклепки полностью соответствуют предъявляемым требованиям.

Гомогенизация слитков является обязательной операцией. Использование негомогенизированных заготовок недопустимо, так как при любых вариантах технологии волочения и отжигов при нагреве под закалку в заклепках формируется крупное зерно.

Таблица 5  
Результаты промышленных испытаний проволоки диам. 4 мм и заклепок из сплава В65, полученных по новой технологии в ООО «Авиасервис»

Условия гомогенизации:												
температура, °С	480		480		480		–		–		–	
время, ч	8		8		8		–		–		–	
Степень деформации после последнего отжига, %	70		60		50		70		60		50	
Механические свойства в закаленном и состаренном состоянии	Соответствуют		Соответствуют		Соответствуют		Соответствуют		Соответствуют		Соответствуют	
Сопротивление срезу в состоянии поставки и в закаленном и состаренном состоянии (не менее 25 кгс/мм <sup>2</sup> , ГОСТ 14838 [20]), кгс/мм <sup>2</sup> , (МПа)	25,6–27,2 (250,88–266,56)		25,6–27,2 (250,88–266,56)		25,6–27,2 (250,88–266,56)		25,6–27,2 (250,88–266,56)		25,6–27,2 (250,88–266,56)		25,6–27,2 (250,88–266,56)	
Микроструктура (не более 40 мкм по ТУ 2829–08), мкм	30–40		30–40		30–40		30–40		30–40		60–80	
Сопротивление срезу (не менее 314 кгс), кгс, (МПа)	350 (3430)	360 (3528)	322 (3155)	352 (3442)	350 (3430)	372 (3645)	368 (3606)	360 (3528)	340 (3322)	–	360 (3528)	354 (3456)
Поверхность	Ровная	Ровная	Ровная	Ровная	Ровная	Ровная	Ровная	Ровная	Бугристая	–	Бугристая	Бугристая
Число трещин при испытаниях на 66%-ную осадку (испытано 6 образцов от партии)	1 шт. раскр. дефекта	–	–	1 шт. раскр. дефекта	–	–	1 шт.	3 шт. 1 шт. раскр. дефекта	–	–	–	–

Применение негомогенизированной заготовки приводит к получению бугристой из-за крупного зерна поверхности заклепок при степени деформации 50–60 % или к трещинам на поверхности заклепок при осадке проволоки со степенью 71,5 % (табл. 5).

Гомогенизация литой заготовки и высокая степень холодной деформации при волочении (60–71,5 %) не обеспечивает 100%-ную расклепываемость, вероятно, из-за пониженной пластичности проволоки.

### Выводы

Разработана новая технология производства заклепочной проволоки из алюминиевого сплава В65 с использованием литья в электромагнитный кристаллизатор и получения длинномерной заготовки малого сечения (9 мм) без неметаллических включений с дисперсной структурой.

Новая технология позволяет:

– повысить качество исходного материала (заготовки) ответственного назначения;

– повысить выход годного и получить проволоку без дефектов литейного и прессового происхождения;

– сократить материальные затраты на производство заклепок из-за снижения энерго- и трудозатрат, в частности в 4 раза уменьшить число промежуточных отжигов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки и ООО «Научно-производственный центр Магнитной Гидродинамики» в рамках научного проекта «Исследование динамических характеристик турбулентных течений расплава при электромагнитной кристаллизации и влияния ее на структуру и свойства непрерывнолитых заготовок малого сечения из новых алюминиевых сплавов для производства тонкой проволоки авиационно-космического назначения».*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шилова Е. И.** Алюминиевый сплав В65 для заклепок // Алюминиевые и магниевые сплавы. — М.: Оборонгиз, 1959. С. 113–143.
2. **Авдулов А. А., Усынина Г. П., Сергеев Н. В., Гудков И. С.** Отличительные особенности структуры и свойств длинномерных слитков малого сечения из алюминиевых сплавов, отлитых в электромагнитный кристаллизатор // Цветные металлы. 2017. № 7. С. 73–77. DOI: 10.17580/tsm.2017.07.12
3. **Арчакова З. Н.** и др. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ., 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1984. — 408 с.
4. **Телешов В. В., Захаров В. В.** и др. Структура и свойства заклепочной проволоки из сплава В65 в зависимости от химического состава сплава и технологии изготовления // Технология легких сплавов. 2008. № 1. С. 25–30.
5. **Лопатина Е. С., Ворошилов Д. С., Запорожец О. А.** Исследование технологических параметров получения слитков из сплава 01417 в электромагнитном кристаллизаторе // Молодежь и наука: сб. матер. VI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. С. 31–35.
6. **Бааке Э.** и др. МГД-технологии в металлургии. Интенсивный курс. Специализация IV. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. — 250 с.
7. **Гецелев З. Н.** и др. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. — М.: Металлургия, 1983. — 152 с.
8. **Первухин М. В., Хацаюк М. Ю., Минаков А. В.** Численное моделирование динамики свободной поверхности и кристаллизации расплава в электромагнитном кристаллизаторе // Индукционный нагрев. 2014. № 1 (27). С. 37–42.
9. **Masahiro Tani, Masafumi Zeze, Takehiko Toh, Keiji Tsunenari.** Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting // Nippon steel technical report. August 2013. No. 104. P. 56–61.
10. **ГОСТ 9012–59.** Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). — Введ. 01.01.1960.
11. **ГОСТ 4784–97.** Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками). — Введ. 01.07.2000.
12. **Hai Hao, Xingguo Zhang, Shan Yao.** Improvement of Casting Speed and Billet Quality of Direct Chill Cast Aluminum Wrought Alloy with Combination of Slit Mold and Electromagnetic Coil / Materials Transactions. 2007. Vol. 48, No. 8. P. 2194–2201.
13. **Grandfield J. F., Davidson C. J., Taylor J. A.** Light Metals / ed. by J. L. Anjier 2001. Warrendal, 2001. P. 911–916.
14. **Evans J. W.** The use of electromagnetic casting for Al alloys and other metals // JOM. 1995. Vol. 47, Iss. 5. P. 38–41.
15. **Yu-bo Zuo, Jian-zhong Cui, Dan Mou, Qing-feng Zhu, Xiang-jie Wang, Lei Li.** Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 2. P. 32–134.
16. **Первухин М. В., Сергеев Н. В.** Расчет параметров электромагнитного кристаллизатора, обеспечивающих устойчивое формирование слитка в магнитном поле // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2010. № 2 (26). С. 153–161.
17. **Первухин М. В., Фигуровский Д. К., Романова Е. В.** Формирование структуры сплава на основе системы Al – Се при кристаллизации под действием электромагнитного поля // Технология легких сплавов. 2010. № 2. С. 71–76.
18. **ГОСТ 21073.1–75.** Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур (с Изменением № 1). — Введ. 01.07.1976.
19. **ОСТ 1 34076–85.** Заклепки с плоско-скругленной головкой. — Введ. 01.07.1986.
20. **ГОСТ 14838–78.** Проволока из алюминия и алюминиевых сплавов для холодной высадки. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). — Введ. 01.01.1979. **ЦМ**

*Tsvetnye Metally*. 2019. No. 3. pp. 76–82  
DOI: 10.17580/tsm.2019.03.11

## PRODUCTION OF RIVET WIRE FROM BILLETS PRODUCED FROM V65 ALLOY BY ELECTROMAGNETIC CRYSTALLIZATION

### Information about authors

V. N. Timofeev, CEO<sup>1</sup>, Head of the Electrotechnology Department<sup>2</sup>  
G. P. Usynina, Chief Materials Specialist<sup>1</sup>  
M. M. Motkov, Head of the Continuous Casting and Plastic Deformation Department<sup>1</sup>  
I. S. Gudkov, Lead Specialist at the Department of High-Frequency Currents<sup>1</sup>, e-mail: rdohead@mail.ru

<sup>1</sup> Research and Production Centre of Magnetic Hydrodynamics, Krasnoyarsk, Russia.

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

### Abstract

The sample light-gauge round ingots continuously cast following a newly developed technique are characterized with a clean and disperse structure. This paper describes a rivet wire production technique based on the use of 9 mm V65 aluminium alloy long-length cast billets produced by electromagnetic crystallization (EMC). When the melt is exposed to high-frequency electromagnetic field, the resultant ingots appear free of such structural flaws as slag inclusions, oxide spots or other defects associated with conventional casting. This technique produces a disperse structure with the size of dendritic cells ~3–6 μm, which is typical of granulated aluminium alloys produced at the cooling rates of 10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> °C/sec.

The authors demonstrate the structural effect occurring in the initial ingot following EMC casting.

Following a comparison with the conventional technique which produces rivet wire from pressed billets, it was established that the new EMC casting technique helps increase the yield due to the elimination of flaws caused by casting and pressing. It can also reduce the power and labour costs and increase the output due to less annealing operations required during wire drawing. The paper describes various drawing sequences for the EMC billets and how they influence the metal structure.

The paper describes the results of a study that looked at the wires produced from homogenized and non-homogenized billets and the effect of the total degree of cold deformation on the grain size and mechanical properties of the wire produced following the new technique. The authors conducted a series of pilot tests and identified the optimum process that would produce aircraft rivets of the desired quality.

This research was funded by the Russian Foundation for Basic Research, the Government of Krasnoyarsk Krai, the Krasnoyarsk Regional Science Foundation and the Research and Production Centre of Magnetic Hydrodynamics under the following research project: Understanding the dynamics of the turbulent flow of the melt under electromagnetic crystallization and how the latter changes the structure and properties of continuously cast light-gauge aluminium alloy billets used for the production of thin wire for aerospace application.

**Key words:** Electromagnetic crystallization, high-frequency electromagnetic field, aluminium alloys, granulated alloys, aviation alloys, super fast crystallization, electromagnetic field crystallization, cast and pressed billet, aircraft rivets.

### References

- Shilova E. I. The V65 aluminium alloy for rivets. Aluminium and magnesium alloys. Moscow : Oborongiz, 1959. pp. 113–143.
- Avdulov A. A., Usynina G. P., Sergeev N. V., Gudkov I. S. Distinctive features of the structure and characteristics of long-length light gauge ingots from aluminium alloys, cast into electromagnetic crystallizer. *Tsvetnye Metally*. 2017. No. 7. pp. 73–77. DOI: 10.17580/tsm.2017.07.12
- Archakova Z. N. ed al. Structure and properties of semi-finished products from aluminium alloys: Reference book. 2<sup>nd</sup> revised edition. Moscow : Metallurgiya, 1984. 408 p.
- Teleshov V. V., Zakharov V. V. et al. The structure and properties of rivet wire from the V65 alloy depending on the alloy's chemical composition and the production technique employed. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2008. No. 1. pp. 25–30.
- Lopatina E. S., Voroshilov D. S., Zaporozhets O. A. Understanding the process parameters in the production of ingots from the 01417 alloy in an electromagnetic crystallizer. *Young People and Science: Proceedings of the 6th National Conference among Undergraduates, Postgraduates and Young Researchers*. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyy universitet, 2011. pp. 31–35.
- Baake E. et al. Magneto-hydrodynamic technology in metallurgy. Intensive course. Specialisation IV. Saint Petersburg : LETI, 2013. 250 p.
- Getselev Z. N. et al. Continuous casting in an electromagnetic crystallizer. Moscow : Metallurgiya, 1983. 152 p.
- Pervukhin M. V., Khatsayuk M. Yu., Minakov A. V. Numerical modelling of the dynamics of the free surface and crystallization of the melt in an electromagnetic crystallizer. *Induktsionnyy nagrev*. 2014. No. 1 (27). pp. 37–42.
- Masahiro Tani, Masafumi Zeze Takehiko Toh, Keiji Tsunenari. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting. *Nippon steel technical report*. August 2013. No. 104. pp. 56–61.
- GOST 9012–59. Metals. Method of Brinell hardness measurement (incl. Revisions 1, 2, 3, 4, 5). Introduced: 01.01.1960.
- GOST 4784–97. Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades (incl. Revisions 1, 2, 3, with amendments). Introduced: 01.07.2000.
- Hai Hao, Xingguo Zhang, Shan Yao. Improvement of Casting Speed and Billet Quality of Direct Chill Cast Aluminium Wrought Alloy with Combination of Slit Mold and Electromagnetic Coil. *Materials Transactions*. 2007. Vol. 48, No. 8. pp. 2194–2201.
- Grandfield J. F., Davidson C. J., Taylor J. A. Light Metals. Ed. by J. L. Anjier 2001. Warrendal, 2001. pp. 911–916.
- Evans J. W. The use of electromagnetic casting for Al alloys and other metals. *JOM*. 1995. Vol. 47. pp. 38–41.
- Yu-bo Zuo, Jian-zhong Cui, Dan Mou, Qing-feng Zhu, Xiang-jie Wang, Lei Li. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 2. pp. 132–134.
- Pervukhin M. V., Sergeev N. V. Design of electromagnetic crystallizer parameters to ensure stable ingot formation in magnetic field. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2010. No. 2 (26). pp. 153–161.
- Pervukhin M. V., Figurovskiy D. K., Romanova E. V. Formation of structure in the Al – Ce alloy under electromagnetic crystallization. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2010. No. 2. pp. 71–76.
- GOST 21073.1–75. Non-ferrous metals. Determination of grain size by comparison with microstructure scale (incl. Revision 1). Introduced: 01.07.1976.
- OST 1 34076–85. Pan head rivets. Introduced: 01.07.1986.
- GOST 14838–78. Wire of aluminium and aluminium alloys for cold upsetting. Specifications (incl. Revisions 1, 2, 3, 4). Introduced: 01.01.1979.

# ORE & METALS WEEKLY

ГОРНОРУДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ · УГОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ · МЕТАЛЛУРГИЯ

ЕЖЕНЕДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ НОВОСТНОЕ ИЗДАНИЕ

БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА:  
<http://www.rudmet.ru/page/omw>

Всем клиентам предлагается оформить бесплатную подписку на продукт Издательского дома «Руда и Металлы» — еженедельное новостное электронное издание "Ore&Metals Weekly", распространяемое бесплатно в виде e-mail рассылки. Тематика издания: новости компаний горной, угольной промышленности, цветной и черной металлургии, а также проектных организаций и производителей оборудования для горно-металлургической отрасли. В издании анонсируются крупнейшие отраслевые мероприятия.

Реклама

