

www.rudmet.ru

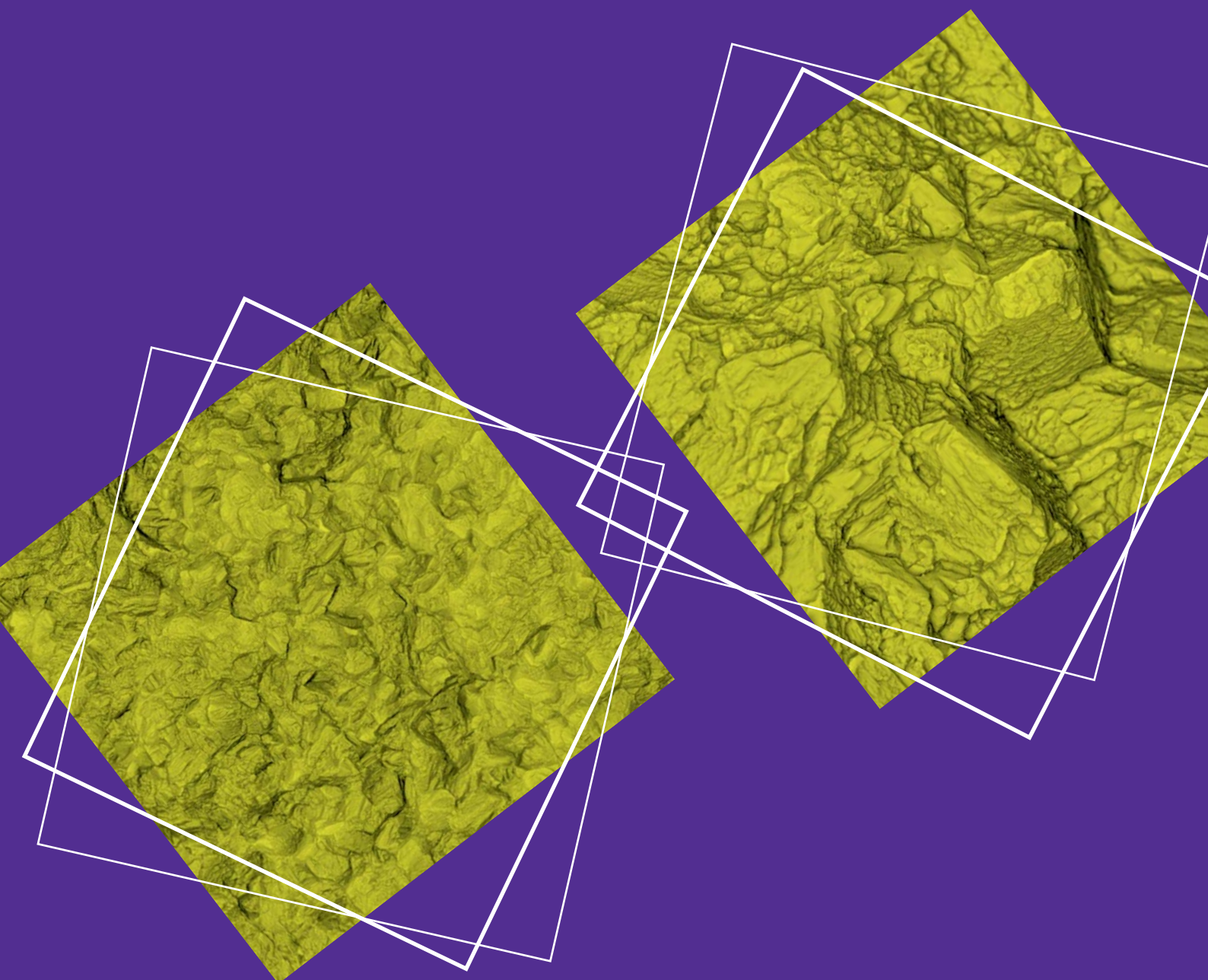
ISSN 0372-2929

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1926 г.
(№ 895)

7.2017



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», АО «Научно-проектное объединение «РИВС», Научно-технического союза по горному делу, геологии и металлургии (Республика Болгария)

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор **А. В. Путилов**
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»), **Н. А. Белов** (редактор раздела «Металлообработка»), **В. А. Бочаров** (редактор раздела «Обогащение»), **Г. Ю. Боярко, В. А. Брюквин, А. А. Быкасов, 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, С. Ю. Ерошевич, А. В. Зиновьев, В. А. Игнаткина, В. С. Кальченко, С. В. Киреев, С. С. Киров, Б. Г. Киселёв, П. А. Козлов, С. И. Корнеев, Ю. А. Король, Б. А. Котляр** (редактор раздела «Экономика и управление производством»), **Ю. А. Котляр, В. А. Крюковский** (редактор раздела «Легкие металлы, углеродные материалы»), **Ф. Д. Ларичкин, 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, 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. Тарасов, А. Н. Фёдоров, Л. Ш. Цемехман, Л. Б. Цымбулов** (редактор раздела «Тяжелые цветные металлы»), **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 **А. А. Шарончикова**; младший редактор **В. С. Катасонова**;
ответственная за материалы, опубликованные на английском языке **Д. В. Аникина**; корректор **Ю. И. Королёва**;
ответственные за предпечатную подготовку издания **О. Ю. Жукова, Н. Г. Неделькина, И. Г. Иваньшина**;
менеджер по производству и распространению **М. А. Уколов**.

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 полиграфическом центре
ФГУП Издательство «Известия»
Адрес типографии: 127254, Москва,
ул. Добролюбова, д. 6.
Тел.: 8(495) 650-38-80

Подписано в печать с оригинал-макета 25.07.17.
Формат 60x90 1/8. Печ. л. 12. Бумага мелованная.
Печать офсетная.
Тираж 1500 экз. Цена свободная.
Дата выхода из печати 03.08.2017

ISSN 0372-2929



9 770372 292006 >

Содержание

Экономика и управление производством

- Международный обзор рынка цветных металлов** 4
Боярко Г. Ю., Хатьков В. Ю. Торговля индивидуальными редкоземельными товарными продуктами на российском рынке 7
Петров В. Л. Подготовка горных инженеров-обогащителей в российских вузах 14

Обогащение

- Смирнов А. А., Икконен П. В., Кознов А. В., Соколов В. Д.** Радиационная оценка технологической схемы комплексного обогащения редкометаллической руды Зашихинского месторождения 20

Тяжелые цветные металлы

- Шульга Е. В., Юрьев А. И., Соловьев Е. М., Соловьева Н. Д.** Оптимизация коллоидного режима в технологии электролитического рафинирования меди 26
Назаренко М. Ю., Кондрашева Н. К., Салтыкова С. Н. Влияние термических превращений в горючих сланцах на их свойства 29
Досмухамедов Н. К., Жолдасбай Е. Е., Нурлан Г. Б., Курмансеитов М. Б. Применение зонной плавки для получения сверхчистой меди: особенности поведения металлов-примесей 34

Благородные металлы и их сплавы

- Жмурова В. В., Немчинова Н. В., Минеев Г. Г.** Кислотное выщелачивание примесей золотосодержащего катодного осадка 41

Легкие металлы, углеродные материалы

- Шахрай С. Г., Скуратов А. П., Дектерев А. А., Шарыпов Н. А.** Комплексный теплотехнический расчет системы газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом 48
Сысоев И. А., Кондратьев В. В., Колмогорцев И. В., Зимина Т. И. Разработка теплообменного устройства для рекуперации тепла при производстве алюминия 55

Редкие металлы, полупроводники

- Садыкова М. М., Цыганкова М. В., Зимина Г. В., Спиридонов Ф. М.** Получение побочных продуктов из отходов азотнокислотной технологии переработки апатитового концентрата 62

Материаловедение

- Колтыгин А. В., Баженов В. Е.** Структура и свойства магниевого сплава МЛ10 (NZ30K), используемого в качестве шихты для производства отливок 68
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 73

Металлообработка

- Полушин Н. И., Маркова И. Ю., Лаптев А. И., Сорокин М. Н.** Прочность соединения стали с твердым сплавом, полученного методом пайки серебряными и латунными припоями 78
Довженко Н. Н., Константинов И. Л., Сидельников С. Б., Авдеев Ю. О. Разработка режимов диффузионной сварки для получения биметаллической сталемедной заготовки металлургического назначения 84

Автоматизация

- Салихов М. З., Салихов З. Г.** Интеллектуальная система автоматического управления мощными вращающимися печами обжига сыпучих металлургических материалов с использованием ассоциативных баз знаний 90

Наши юбиляры

- ЧУГАЕВУ Льву Владимировичу — 80 лет** 47

Журнал включен в Международные базы данных Scopus, Chemical Abstracts Service

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ без самоцитирования (2015) 0,362

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).

Отличительные особенности структуры и свойств длинномерных слитков малого сечения из алюминиевых сплавов, отлитых в электромагнитный кристаллизатор

УДК 669.71.055

А. А. Авдулов, начальник отдела технологий непрерывного литья¹**Г. П. Усынина**, начальник независимой лаборатории²**Н. В. Сергеев**, ведущий инженер отдела токов высокой частоты¹**И. С. Гудков**, ведущий инженер отдела технологий непрерывного литья¹, эл. почта: rdohead@mail.ru¹ ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики», Красноярск, Россия.² ООО «КиК», Красноярск, Россия.

Развитие технологии непрерывного литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор началось в 1980-х гг. под руководством З. Н. Гецелева. В компании ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» продолжается развитие данного способа литья. На сегодняшний день сотрудники освоили непрерывное литье длинномерной заготовки малого сечения и литье цилиндрических слитков диаметром 70 мм. В настоящей работе описаны свойства заготовок малого сечения. Литье в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) принципиально отличается от разновидностей литья слитков отсутствием контакта расплавленного металла со стенками формы, что увеличивает скорость кристаллизации и ведет к воздействию на расплав высокочастотного электромагнитного поля. Приведены результаты исследований структуры и свойств длинномерных слитков диаметром 8 мм из алюминиевых сплавов, отлитых в ЭМК. Отмечено измельчение дендритных ячеек и уменьшение толщины эвтектических прослоек. Показано, что литье в ЭМК позволяет обеспечить чистоту металла по неметаллическим включениям без предварительной очистки расплава (рафинирования, дегазации и т. д.). Отсутствие неметаллических включений и других загрязнений в слитке малого сечения, отлитом в ЭМК, связано с особенностями кристаллизации расплава в высокочастотном электромагнитном поле. Установлено, что слитки малых диаметров, отлитые в электромагнитный кристаллизатор, имеют диспергированную структуру с размером дендритной ячейки ~4 мкм, который характерен для гранулируемых алюминиевых сплавов, полученных со скоростями охлаждения 103–104 °С/с. Получен литой материал, который по своим свойствам сравним с деформированным.

Ключевые слова: электромагнитный кристаллизатор, литье металлов в электромагнитном поле, алюминиевые сплавы, электромагнитное воздействие на расплав, токи высокой частоты, гранулируемые сплавы.

DOI: 10.17580/tsm.2017.07.12

Введение

Развитие технологии непрерывного литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор началось в 1980-х гг. под руководством З. Н. Гецелева [1]. Литье в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) принципиально отличается от разновидностей литья слитков отсутствием контакта расплавленного металла со стенками формы, что повышает качество поверхности слитка [2, 3]. Кроме бесконтактного формообразования при литье в ЭМК обеспечивается повышение интенсивности охлаждения заготовок [4–7]. Это происходит вследствие того, что охлаждение их осуществляется струйной подачей воды непосредственно на поверхность заготовки возле фронта кристаллизации. Скорость теплоотвода и, как следствие, кристаллизации центральных областей лимитируется коэффициентом теплопроводности материала заготовки.

В связи с этим в процессе литья крупногабаритных слитков образуется лункообразный фронт кристаллизации. При литье заготовок малого диаметра (8–12 мм) отношение площади поперечного сечения к длине окружности на порядок меньше, чем у крупногабаритных. Таким образом, у литых заготовок малого сечения скорость кристаллизации будет существенно выше, особенно в центральной зоне. Благодаря этому при литье таких заготовок фронт кристаллизации имеет пологий вид.

Важным также является то, что созданные электромагнитным полем магнитогидродинамические течения в литой заготовке малого сечения интенсивно омывают весь фронт кристаллизации. При литье же крупногабаритных слитков в ЭМК интенсивная циркуляция расплава присутствует только на периферии слитка.

В связи с тем, что структура является наиболее чувствительной характеристикой изменяющихся условий

кристаллизации, в данной работе были изучены ее особенности, а также свойства заготовок из алюминиевых сплавов диаметром 8 мм, отлитых в ЭМК.

Методика исследования

В индукционной печи с массой загрузки 240 кг (ООО «КиК», Красноярск) были приготовлены алюминиевые сплавы 01417м, СвАМг6 и далее отлиты в чушку. Выбор этих сплавов был сделан исходя из тех соображений, что их в дальнейшем можно использовать в качестве заготовок для производства электротехнической и сварочной проволоки.

На опытно-промышленном плавильно-литейном комплексе с электромагнитным кристаллизатором для литья слитков малого сечения (ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», Красноярск) после расплавления чушки из вышеуказанных сплавов были отлиты заготовки диаметром 8 мм и проведена их смотка в бухты диаметром 1300 мм.

Необходимо отметить, что при приготовлении сплавов расплав не проходил предварительную очистку, т. е. его не подвергали обработке рафинирующими флюсами, дегазации и др.

Сумму РЗМ (La, Ce, Pr, Nd) и иттрия в сплаве 01417м системы Al – РЗМ определяли методом классического химического анализа по ГОСТ 11739.22–90 [8]. Химический состав сплава СвАМг6 определяли на оптическом эмиссионном спектрометре Spectrolab-M9.

Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX51. При определении размера дендритной ячейки использовали систему анализа изображений SIAMS Photolab.

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

Твердость по Бринеллю определяли с использованием стального шарика диаметром 5 мм при нагрузке 250 кг по ГОСТ 9012–59 [9] на приборе НВ-3000В.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования литых заготовок малого сечения сплава 01417м с содержанием 7,04 % РЗМ показали, что их микроструктура свойственна сплавам Al – РЗМ, полученным с высокими скоростями охлаждения расплава ($\sim 10^3$ °С/с), т. е. гранулам диаметром 1–4 мм с дендритным параметром 3–6 мкм [2].

Микроструктура представляет собой твердый α -раствор, по границам дендритных ячеек которого располагается дисперсная эвтектика ($\alpha + Al_7Me$) (рис. 1). Дендритный параметр в исследуемых слитках составил 4,1–8,7 мкм, при этом наблюдали его уменьшение при увеличении скорости литья от 4,4 до 14,5 мм/с. Необходимо отметить, что вместе с измельчением

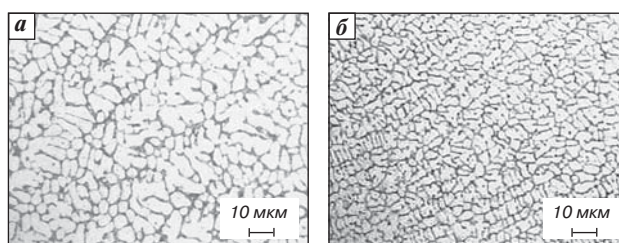


Рис. 1. Микроструктура слитков диаметром 8 мм из сплава 01417м, отлитых в ЭМК при разных скоростях, мм/с: а – 4,4; б – 7,4

дендритных ячеек имело место и уменьшение толщины эвтектических прослоек (рис. 1) [10–13]:

Скорость литья, мм/с	Средний размер дендритной ячейки, мкм
4,4	8,7
7,4	7,0
10,8	4,4
14,5	4,1

Ранее при исследовании сплавов Al – РЗМ было установлено, что при скоростях охлаждения 10^3 °С/с структуру сплава Al – 10 % Се можно охарактеризовать как квазидоэвтектическую и кристаллизация в нем идет по метастабильной диаграмме состояния. В исследуемых образцах сплава 01417м также наблюдали квазидоэвтектическую структуру. В работе [4] говорится о том, что при скорости охлаждения 10^3 °С/с и увеличении в сплаве Al – РЗМ церия до 17 % первичные интерметаллиды отсутствуют.

Таким образом, можно предположить, что при отливке слитков малых диаметров в электромагнитный кристаллизатор возможно введение в алюминиевый расплав до 17 % РЗМ без получения первичных интерметаллидов при кристаллизации сплава. Это, в свою очередь, может позволить увеличить прочностные и жаропрочные свойства алюминиевого сплава с редкоземельными металлами. Известно, что увеличение содержания РЗМ от 3 до 15 % вызывает аддитивное повышение предела прочности от 140–150 до 290–350 МПа соответственно. Сплавы с 10–15 % РЗМ соответствуют лучшим жаропрочным алюминиевым сплавам Д20, АК4-1 и др. из-за гетерогенной структуры с равномерно распределенными тугоплавкими интерметаллидами редкоземельных металлов, малорастворимыми в твердом алюминии.

В микроструктуре исследуемых заготовок сплава 01417м, отлитых в ЭМК, не были обнаружены дефекты металлургического характера в виде оксидных пленок, твердых неметаллических включений, пористости, несмотря на то, что расплав не проходил рафинирующую обработку и отливку проводили без использования каких-либо фильтров.

Отсутствие неметаллических включений и других загрязнений в слитке малого сечения, отлитом в ЭМК, связано с особенностями кристаллизации расплава в высокочастотном электромагнитном поле.

Переменное электромагнитное поле, образованное индуктором кристаллизатора, наводит вихревые токи в расплаве, который непрерывно подается в область кристаллизации. Под действием вихревых токов и магнитного поля индуктора в расплаве образуются силы Лоренца. Данные силы равномерно обжимают расплав и обеспечивают формообразование непрерывно-литого слитка. При этом расплав не контактирует с какими-либо поверхностями. Варьируя значения электромагнитных сил в расплаве путем изменения силы и частоты тока в индукторе, можно получать непрерывно-литые слитки разного диаметра. Также электромагнитные силы образуют тороидальное течение расплава, омывающего фронт кристаллизации. В результате течения расплава примесные частицы сталкиваются и коагулируют в более крупные соединения. При этом оксидные включения адсорбируют на своей поверхности водород. За счет разной плотности чистого расплава и неметаллических включений происходит процесс разделения сред по плотности. Включения, имеющие плотность меньше плотности расплава, флотируются на поверхность расплава. В связи с тем, что процесс литья непрерывен, при прохождении фронта кристаллизации загрязнения, находящиеся на поверхности слитка, удаляются охлаждающей жидкостью, подаваемой на слиток [14–17].

Необходимо отметить, что при литье в ЭМК крупногабаритных слитков не было зафиксировано удаление неметаллических включений. Обнаружение данного эффекта напрямую связано с диаметром слитка и интенсивностью магнитогидродинамических течений в слитке. При литье слитков малых диаметров интенсивно циркулирует весь расплав в зоне кристаллизации, а при литье крупногабаритных слитков интенсивная циркуляция расплава наблюдается только в области периферии, что не позволяет выдавить существенную долю неметаллических включений на поверхность слитка. При этом в известных электромагнитных кристаллизаторах для литья крупногабаритных слитков специально использовали средства для снижения циркуляции расплава в области мениска слитка. При литье слитков малого сечения этого не требуется, так как диаметр струи металла, подаваемого в кристаллизатор, совпадает с диаметром отливаемого слитка.

Результаты испытаний механических свойств заготовок сплава 01417м диаметром 8 мм, отлитых в ЭМК, показали, что существует прямо пропорциональная зависимость между увеличением их прочностных свойств и повышением скорости литья от 4,4 до 14,5 мм/с (табл. 1). При этом пластичность заготовок снижается, но остается на достаточно высоком уровне (12,4–15,5 %).

Такой уровень прочностных свойств имели горяче-прессованные прутки из гранул сплава Al – 7 % РЗМ,

Таблица 1
Механические свойства слитков диаметром 8 мм из сплава 01417м, отлитых в ЭМК

Скорость литья, мм/с	Механические свойства			
	предел прочности, МПа	предел текучести, МПа	относительное удлинение, %	твёрдость по Бринеллю НВ
14,5	205	110	13,6	51,9
10,8	205	109	17,2	51,9
7,4	189	104	23,2	47,5
4,4	172	89	23,8	43,7

причем прессованные с высоким коэффициентом вытяжки ($\mu = 55$) [2, 4, 6].

Результаты замера твердости прутков диаметром 8 мм из сплава 01417м также показали, что у образцов, отлитых при скорости литья 14,5 мм/с, она наибольшая.

Микроструктура литых заготовок малого сечения из сплава СвАМг6 характеризуется равномерным распределением по всему сечению дисперсных выделений эвтектических фаз, размер которых уменьшается при увеличении скорости литья от 2 до 10 мм/с в ~2 раза и составляет меньше 1 мкм (рис. 2). Этот факт также свидетельствует о значительном измельчении микроструктуры в результате высокой скорости кристаллизации расплава из-за интенсивной циркуляции расплава у зоны кристаллизации, что способствует увеличению градиента температур и, как следствие, теплового потока через фронт кристаллизации.

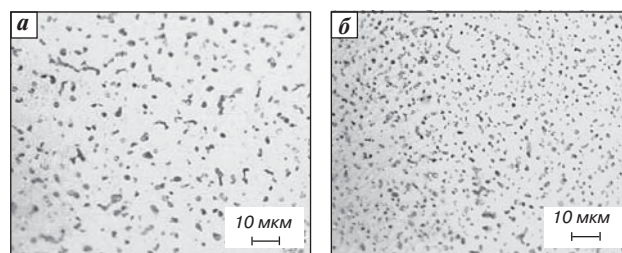


Рис. 2. Микроструктура слитков диаметром 8 мм сплава СвАМг6, отлитых в ЭМК при разных скоростях, мм/с: а — 4; б — 10

Таблица 2
Механические свойства слитков диаметром 8 мм из сплава СвАМг6, отлитых в ЭМК

Скорость литья, мм/с	Механические свойства		
	предел прочности, МПа	предел текучести, МПа	относительное удлинение, %
2	335	164	20,8
4	340	170	24,6
7	350	180	17,0
10	360	182	24,3

В микроструктуре непрерывно-литых слитков малого сечения из сплава СвАМг6, отлитых в ЭМК, также не обнаружены дефекты металлургического характера.

Анализ механических свойств прутков диаметром 8 мм из сплава СвАМг6, отлитых в ЭМК, показывает, что с увеличением скорости литья от 2 до 10 мм/с наблюдается повышение предела прочности и предела текучести на 25 и 18 МПа соответственно (табл. 2). Зависимость относительного удлинения от скорости литья слитков малого сечения в ЭМК не была установлена.

Такой уровень механических свойств характерен для отожженных прессованных прутков из сплава АМг6, изготовленных из слитков, отлитых в обычный кристаллизатор.

Заключение

Литье длинномерных слитков малого сечения диаметром 8 мм в электромагнитный кристаллизатор обеспечивает:

- получение дисперсной структуры, сопоставимой с гранулами, за счет большего теплоотвода и интенсивной циркуляции расплава у зоны кристаллизации;
- чистоту металла по оксидным и твердым неметаллическим включениям в результате интенсивного выдавливания их на поверхность слитка электромагнитными силами, а затем удаления охлаждающей жидкостью;
- получение в непрерывно-литых слитках такого же уровня механических свойств, как в деформированном металле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гецелев З. Н.** и др. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. — М.: Металлургия, 1983. — 152 с.
2. **Добаткин В. И., Елагин В. И.** Гранулируемые алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1983. — 176 с.
3. **Iscó M., Harumi K., Katsusome N.** Supersaturation and decomposition of Al – Fe alloys during solidification // J. Japan Inst. Light Met. 1973. Vol. 25, No. 1. P. 1–9.
4. **Азаматов Р. А., Александров В. К., Андреев А. Д.** и др. Металлургия легких сплавов. — М.: Металлургия, 1983. — 311 с.
5. **Шморгунов В. Г., Гуревич Л. М., Трудов А. Ф., Писарев С. П.** и др. Механические свойства проволоки с несущим слоем из алюминиевого сплава 01417 // Известия ВолГТУ. 2014. Т. 136, № 9. С. 15–18.
6. **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.
7. **Бааке Э.** и др. МГД-технологии в металлургии. Интенсивный курс. Специализация IV. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. — 250 с.
8. **ГОСТ 11739.22–90.** Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения редкоземельных элементов и иттрия. — Введ. 1991–07–01.
9. **ГОСТ 9012–59.** Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. — Введ. 1960–01–01.
10. **Стеценко В. Ю.** Механизмы процесса кристаллизации металлов и сплавов // Литье и металлургия. 2013. № 1. С. 48–54.
11. **Стеценко В. Ю.** Определение механизмов литья алюминиево-кремниевых сплавов с высокодисперсной и инвертированной микроструктурой // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 22–29.
12. **Верховлюк А. М., Щерещкий А. А., Лахненко В. Л., Апухтин В. В., Назаренко А. В.** Перспективные модификаторы для сплавов на основе алюминия // Литье и металлургия. 2013. № 3. С. 68–71.
13. **Masahiro Tani, Masafumi Zeze Takehiko Toh, Keiji Tsunenari.** Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting // Nippon steel technical report. 2013. No. 104. P. 56–61.
14. **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.
15. **Grandfield J. F., Davidson C. J., Taylor J. A.** Application of a new hot tearing analysis to horizontal direct chill cast magnesium alloy AZ91 // Light Metals. 2001. No. 1. P. 895–901.
16. **Evans J. W.** The use of electromagnetic casting for Al alloys and other metals // JOM. 1995. Vol. 47. P. 38–41.
17. **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. 24. P. 2408–2413.

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2017. No. 7. pp. 73–77
DOI: 10.17580/tsm.2017.07.12

DISTINCTIVE FEATURES OF THE STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF LONG-LENGTH LIGHT GAUGE INGOTS FROM ALUMINIUM ALLOYS, CAST INTO ELECTROMAGNETIC CRYSTALLIZER

Information about authors

A. A. Avdulov, Head of Department of Continuous Casting Technologies¹
G. P. Usynina, Head of Independent Laboratory²
N. V. Sergeev, Leading Engineer of High-frequency Currents Department¹
I. S. Gudkov, Leading Engineer of Department of Continuous Casting Technologies¹, e-mail: rdohead@mail.ru

¹ RPC “Magnetic Hydrodynamics”, Krasnoyarsk, Russia.

² LLC “KiK”, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract

The technology for continuous casting of aluminium alloys into electromagnetic crystallizers was first being developed in 1980s under management of Z. N. Getselev. The given method is being further developed in the RPC “Magnetic Hydrodynamics” company. By now its employees have mastered a

continuous casting of long-length light gauge blanks and casting of cylindrical ingots with a diameter of 70 mm. This paper describes the properties of light gauge blanks. Casting into an electromagnetic crystallizer is significantly different than the methods for casting of ingots where the molten metal has no contact with the mould’s wall; which enables a faster crystallization and thus affects the melt of a high-frequency electromagnetic field. There are given the results of researching the structure and properties of long-length ingots (with a diameter of 8 mm) from aluminium alloys that were cast into an electromagnetic crystallizer. A refinement of dendrite cells and a reduction of the width of eutectic layers were noted. It was shown that casting into electromagnetic crystallizers can guarantee metal cleanliness in the case of non-metallic inclusions without a preliminary cleaning of the melt (refinement, degasification etc.). The reason for the absence of non-metallic inclusions and other impurities in light gauge ingots, cast into an electromagnetic crystallizer, lies in properties of crystallization of the melt in a high-frequency electromagnetic field. It was determined that ingots with small diameters, cast into an electromagnetic crystallizer, have a dispersed structure where the dendrite cell size is $\approx 4 \mu\text{m}$, which is typical for granulated aluminium alloys that are obtained at cooling speeds of $10^3\text{--}10^4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{sec}$. The obtained cast material’s properties are comparable with properties of a deformed material.

Key words: electromagnetic crystallizer, casting of metals into electromagnetic field, aluminium alloys, electromagnetic effect on the melt, high-frequency currents, granulated alloys.

References

1. Getslev Z. N. et al. Continuous casting in electromagnetic crystallizer. Moscow : Metallurgiya, 1983. 152 p.
2. Dobatkin V. I., Elagin V. I. Granulated aluminium alloys. Moscow : Metallurgiya, 1983. 176 p.
3. Isco M., Harumi K., Katsusome N. Supersaturation and decomposition of Al – Fe alloys during solidification. *Journal of Japan Institute of Light Metals*. 1973. Vol. 25, No. 1. pp. 1–9.
4. Azamatov R. A., Aleksandrov V. K., Andreev A. D. et al. Light alloys metallurgy. Moscow : Metallurgiya, 1983. 311 p.
5. Shmorgun V. G., Gurevich L. M., Trudov A. F., Pisarev S. P. et al. Mechanical properties of wire with bearing layer made of aluminium alloy 01417. *Izvestiya VolGTU*. 2014. Vol. 136, No. 9. pp. 15–18.
6. Lopatina E. S., Voroshilov D. S., Zaporozhets O. A. Investigation of technological parameters of obtaining of 01417 alloy ingots in electromagnetic crystallizer. *Youngsters and science: collection of materials of the VI All-Russian scientific-technical conference of students, post-graduate students and young scientists*. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyy universitet, 2011. pp. 31–35.
7. E. Baake et al. MHD technologies in metallurgy. Intensive course specific IV. Saint Petersburg : SPbGETU "LETI", 2013. 250 p.
8. State Standard GOST 11739.22–90. Aluminium casting and wrought alloys. Methods for determination of rare-earth elements and yttrium. Introduced: 1991–07–01.
9. State Standard GOST 9012–59. Metals. Method of Brinell hardness measurement. Introduced: 1960–01–01.
10. Stetsenko V. Yu. Mechanisms of crystallization process of metals and alloys. *Lite i metallurgiya*. 2013. No. 1. pp. 48–54.
11. Stetsenko V. Yu. Definition of the casting mechanisms of aluminum-silicon alloys with superfine and inverted microstructure. *Lite i Metallurgiya*. 2013. No. 2. pp. 22–29.
12. Verkhovlyuk A. M., Shcheretskiy A. A., Lakhnenko V. L., Apukhtin V. V., Nazarenko A. V. Prospective modifiers for aluminum-based alloys. *Lite i Metallurgiya*. 2013. No. 3. pp. 68–71.
13. Masahiro Tani, Masafumi Zeze Takehiko Toh, Keiji Tsunenari. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting. *Nippon steel technical report*. 2013. No. 104. pp. 56–61.
14. 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. pp. 2194–2201.
15. Grandfield J. F., Davidson C. J., Taylor J. A. Application of a new hot tearing analysis to horizontal direct chill cast magnesium alloy AZ91. *Light Metals*. 2001. No. 1. pp. 895–901.
16. Evans J. W. The use of electromagnetic casting for Al alloys and other metals. *JOM*. 1995. Vol. 47. pp. 38–41.
17. 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. 24. pp. 2408–2413.

**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.

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



Реклама