УДК 621.4

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

© 2014 г. **Ф.В. Гречников, Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов**

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ) им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 20.05.14 г., доработана 21.07.14 г., подписана в печать 29.07.14 г.

Предложена технология получения алюминиевых высокопрочных электропроводных сплавов и плоских образцов, основанная на способе литья погружением с воздействием на процесс кристаллизации расплава слабых импульсов тока (СИТ), импульсных магнитных полей (ИМП) с последующей многоцикловой прокаткой. Объектами исследования были сплавы, содержащие 97,7–98,3 % Al и легирующие добавки (Cu, Mg, Mn, Si, Fe, Zn, Sc, Zr). Рассмотренная технология позволила получить образцы толщиной 0,20–0,25 мм с наноразмерной структурой (d < 100 нм). Установлено, что воздействия ИМП и СИТ оказывают разное влияние на физические характеристики сплава. Обработка СИТ в сравнении с воздействием ИМП позволяет получить более высокие показатели прочности (до 430 МПа) и электропроводности (вплоть до 55 % от электропроводности меди), но меньшие значения пластичности. При снижении в сплаве содержания алюминия на 0,5 % его электропроводность уменьшается на 6–14 %, причем наибольшее ее падение (до 14 %) наблюдается на образцах, обработанных СИТ, а наименьшее (до 6 %) – с воздействием ИМП.

Ключевые слова: литье, кристаллизация, прокатка, импульсы тока, магнитные поля, структура, сплав, электропроводность, прочность.

A new technology of fabrication of high-strength electroconductive aluminum alloys and plane samples, which is based on the method of casting by immersion with the action of weak current pulses (WCPs) and pulsed magnetic fields (PMFs) with the subsequent multicycle rolling, is proposed. The object of the investigation were alloys containing 97,7–98,3 % Al and alloying additives (Cu, Mg, Mn, Si, Fe, Zn, Sc, and Zr). The considered technology enabled us to fabricate the samples 0,20–0,25 mm thick with a nanodimensional structure (d < 100 nm). It is established that the PMF and WCP effects differently affect the physical characteristics of the alloy. The WCP treatment compared with the PMF enables one to attain higher strength (up to 430 MPa) and electrical conductivity (up to 55 % IACS) but lower plasticity. As the aluminum content in the alloy decreases by 0,5 %, its electrical conductivity lowers by 6–14 %, and its largest drop (up to 14 %) is observed for the WCP-treated samples, while the smallest one (up to 6%) is observed for the PMF-treated samples.

Keywords: casting, crystallization, rolling, current pulses, magnetic fields, structure, alloy, electrical conductivity, strength.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрос интерес к алюминиевым сплавам, используемым в электротехнической промышленности, что подтверждается растущим количеством изобретений в ряде промышленно развитых стран [1—10]. Разработка новых алюминиевых проводниковых материалов вызвана рядом преимуществ по сравнению с медью и ее сплавами. В настоящее время в основных промышленных странах мира, в том числе и в России, известно несколько десятков проводниковых сплавов алюминия. Это в первую очередь сплавы систем Al—Mg—Si, Al—Mg—Si—Cu, Al—Mg—Si—Cu—Fe с различными добавками и жестким ограничением суммы содержаний Ti + Mn + V + Cr до 2,5 % (например, сплавы 1327 и 01117). Однако многие из них не удовлетворяют современным требованиям по структуре и показателям прочности при высоких значениях электропроводности.

Анализируя влияние различных легирующих элементов на свойства алюминиевых сплавов, ус-

Гречников Ф.В. – чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, проф., и.о. председателя СамНЦ РАН, зав. кафедрой обработки металлов давлением СГАУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). Тел.: (846) 337-53-81. E-mail: fgrech@ssc.smr.ru.

Демьяненко Е.Г. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: e-dem@mail.ru.

Попов И.П. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: igr_popov@mail.ru.

тановлено, что незначительно снижают электропроводность Zn, Ni, Si, Mo, Cd, Fe, Ag, Mg, W, Zr, а сильно — Cr, Li, Mn, Ti, Be. Увеличению твердости алюминия способствуют добавки Zn, Mn, W, Mg, Cu, Ni, Ti, Ca, Zr, Mo, атомные радиусы которых отличаются от таковых алюминия. Соответственно, очень слабо влияют на этот показатель нерастворимые добавки Bi, Sn, Sb, Cd, Ag, как мало отличающиеся от Al по величине атомного радиуса.

Для алюминиевых проводниковых сплавов наиболее применима низкотемпературная термомеханическая обработка [11]. В соответствии с принципами легирования и поставленными в работе требованиями по разработке сплавов с упорядоченным сочетанием прочностных характеристик и электропроводности выбраны двойные квазибинарные системы типа $A—D_xC_y—D_kB_z$, например $Al—Mg_2Si—MgZn_2$ и $Al—Mg_2Si—MgAg$ с добавками железа, бора, скандия и циркония. Сумма примесей в них не должна превышать 0,1 %, а Ti + V + Cr ≤ ≤ 0,03 %. Это обеспечивается чистотой исходной шихты по всем элементам, футеровкой, технологией плавки и литья. При термомеханической обработке подобных сплавов возможно получить субмикрокристаллические частицы вплоть до наноразмерных интерметаллидов, например Mg_2Si, $MgZn_2$, или полигональные кристаллы в виде тройных соединений Sc_2Si_2Al, необходимые для производства высокопрочных электропроводных алюминиевых сплавов [5—7].

Целью настоящей работы являлась разработка технологии получения алюминиевых сплавов высокой прочности и электропроводности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения исследований выбраны сплавы 4 химических составов — по два образца на каждый состав, полученные кристаллизацией расплава с воздействием слабых импульсов тока (СИТ) (отмечен индексом «-1») или импульсных магнитных полей (ИМП) («-2») и последующей прокаткой (табл. 1). В качестве легирующих компонентов использованы их лигатуры.

Эксперименты осуществлялись при частоте 500 кГц, обеспечивающей более высокие показатели электропроводности и прочности образцов алюминия в сравнении с 200 и 1000 кГц.

Одним из способов измельчения структуры является воздействие СИТ на кристаллизующийся

Таблица 1
Химический состав исследуемых образцов

№ обр.	Содержание, мас.%								
	Cu	Mn	Zr	Sc	Fe	Si	B	Mg	Al
10-1 10-2	0,8	0,6	0,1	0,1	0,01	0,1	0,06	–	ост. (98,13)
12-1 12-2	–	–	–	0,11	0,35	0,45	0,03	0,55	ост. (98,31)
13-1 13-2	0,4	–	–	0,2	0,35	0,5	0,02	0,6	ост. (97,93)
14-1 14-2	–	1,4	0,4	0,06	0,3	0,1	–	–	ост. (97,70)

расплав [13]. Возникающая при этом акустическая волна играет роль фактора, организующего синхронные движения надмолекулярных структур, повышая локальную теплопроводность.

Другим методом, влияющим на структурообразование, является воздействие на кристаллизующийся металл ИМП [14]. Индукция магнитного поля обеспечивает равнозернистость по всему объему литой заготовки и равную плотность. Мощность импульсов (0,3—0,4 кДж) подбиралась из условия невозможности выплескивания расплава из тигля, а их количество до момента полной кристаллизации расплава составило от 8 до 10.

В работе [15] показано, что эффективным способом управления структурообразованием является литье «погружением». По этой технологии получают высококачественные отливки с плотной структурой, что позволяет обрабатывать их в процессах пластического деформирования с большими степенями деформации. Во избежание роста зерен в момент кристаллизации отливки в оснастке использован минимальный объем тигля с расплавом, равный 2 частям объема отливки в оснастке. В результате получена отливка со сплошной структурой и более измельченным зерном за счет одновременной кристаллизации всего объема расплава в тигле и оснастке и воздействия СИТ или ИМП (рис. 1).

Полученные в алундовых тиглях при t = 950± ±25 °С отливки в виде цилиндров с диаметром d = = 20 мм подвергали гомогенизации при t = 450± ±10 °С в течение 4 ч, а затем осадке между плоскими плитами на универсальном гидропрессе ЦДМПУ-10 («Werkstoffprufmaschinen», Германия) на 60—65 % по высоте до 6—8 мм. После чего образцы прокатыва-

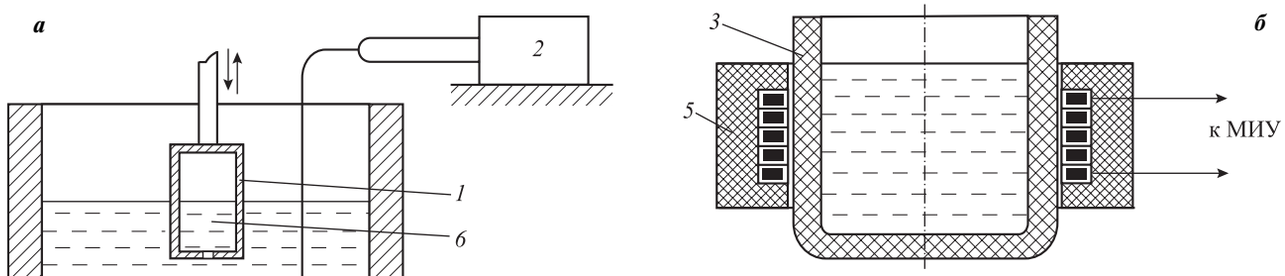

Рис. 1. Схема получения отливок из алюминиевых сплавов при воздействии на расплав
СИТ (***а***) и ИМП (***б***)
1 – оснастка, ***2*** – формирователь, ***3*** – тигель, ***4*** – расплав, ***5*** – индуктор, ***6*** – отливка

ли на 4-валковом прецизионном прокатном стане в условиях многоциклового деформирования с ε = = 15÷20 % за цикл до толщины 0,2—0,25 мм и подвергали исследованиям на химический состав, электропроводность и прочность.

Микроструктуру изучали на электронном микроскопе TESCAN Vega («Tescan, s.r.o.», Чехия). Оценку химического состава фаз осуществляли с применением энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа INCAx-act («Oxford Instruments», Великобритания). Элементный анализ проводили с помощью электронно-зондового метода.

Образцы для металлографического исследования шлифовали и полировали с использованием пасты ГОИ (грубой, средней, тонкой) согласно ТУ6-18-36-85 (оксид хрома Cr_2O_3). Электрополировку проводили в течение 5 с в электролитической ванне, содержащей 23 % $HClO_4$ и 73 % C_2H_5OH. Анодом служила нержавеющая сталь. На выпрямителе постоянного тока (ВСА-5) анодное напряжение составляло 40 В. Данный электролит является специфическим для Al-сплавов, так как одновременно с электрополировкой происходит и травление образцов.

Величину удельной электрической проводимости измеряли вихретоковым методом с помощью структуроскопа ВС-30Н (МНПО «Спектр», Россия) при толщине образца 0,6 мм (со среднеквадратичной погрешностью не более 0,7 % в диапазоне измерений σ = 13÷37 МСм/м). Это минимальная толщина при использовании данного прибора.

Предел прочности и относительное удлинение определяли в соответствии с ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы на растяжение тонких листов и лент» со среднеквадратичной погрешностью измерения ±0,6 % с помощью машины для испытаний материалов на растяжение Н5КТ («Tinius Olsen», Англия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

В соответствии с методикой испытаний определены физические и механические свойства алюминиевых сплавов (табл. 2).

Из восьми исследуемых образцов в качестве примера на рис. 2 представлена структура обр. 13-1 и спектр его элементного состава, а на рис. 3 — карта распределения в нем элементов Al, Fe, Cu, Mg.

Спектр элементного состава получен и усреднен для участка размером 15×15 мкм путем сканирования выбранной области.

Данные рис. 3 свидетельствуют о том, что благодаря физическому воздействию СИТ легирующие элементы равномерно распределены по всей матрице сплава и имеются частицы с размером менее 100 нм (рис. 4).

На основании полученных данных выявлено следующее. Максимальной электропроводностью

Таблица 2
Значения удельной электропроводности, предела прочности и относительного удлинения для образцов, полученных с воздействием СИТ и ИМП

№ обр.	σ, МСм/м	$\sigma_в$, МПа	$\delta_р$, %
Воздействие СИТ			
10-1	31,2	268	7,10
12-1	31,6	274	5,07
13-1	28,4	397	4,82
14-1	27,0	433	6,39
Воздействие ИМП			
10-2	30,2	284	10,3
12-2	31,4	278	7,8
13-2	29,7	302	8,2
14-2	29,1	283	10,1

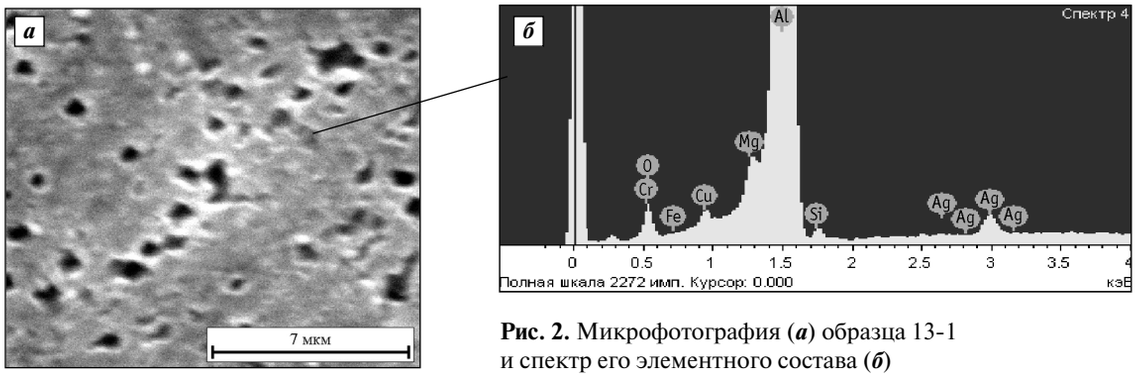

Рис. 2. Микрофотография (***а***) образца 13-1 и спектр его элементного состава (***б***)

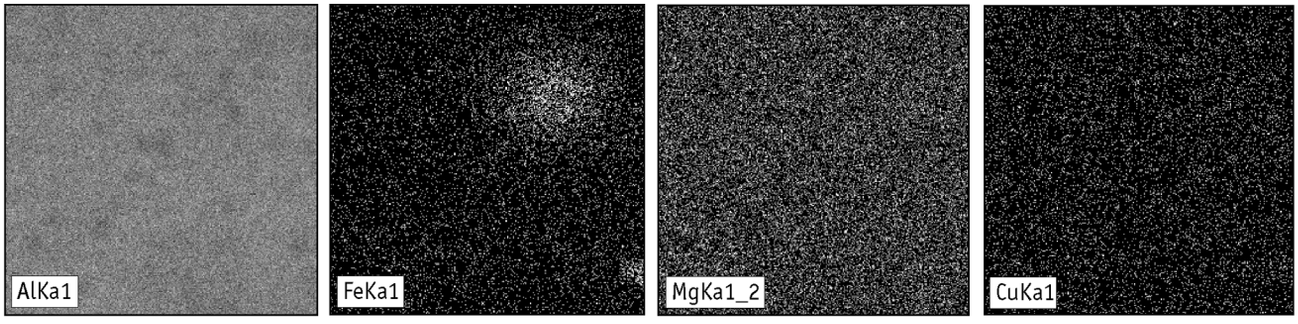

Рис. 3. Карта распределения элементов в образце 13-1

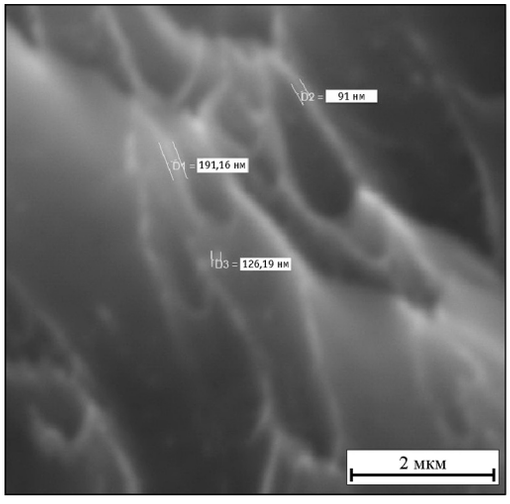

Рис. 4. Величины размеров частиц в образце 13-1

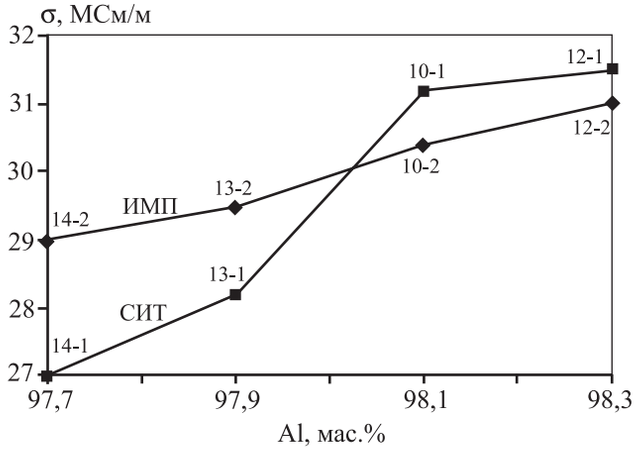

Рис. 5. Изменение электропроводности исследуемых сплавов в зависимости от содержания алюминия

(до 54,5 % от ее значения для меди, равного σ = = 58 МСм/м) обладают сплавы, содержащие более 98 % алюминия (рис. 5). При снижении его концентрации на 0,5 % величина σ снижается на 6—14 %, причем наибольшее ее падение (до 14 %) наблюдается на образцах, полученных с воздействием СИТ, а наименьшее — с ИМП.

Наибольшей прочностью обладают сплавы систем Al—Mg—Cu—Fe и Al—Mn—Si—Fe, в которых содержание алюминия менее 98 %. Если образцы с воздействием при кристаллизации СИТ проявляют закономерность в виде роста предела прочности с 268 до 433 МПа с уменьшением концентрации алюминия, то образцы, обработанные ИМП, меняют прочность в более узком интервале: 278—302 МПа.

ВЫВОДЫ

1. Электропроводность алюминиевых сплавов зависит от содержания легирующих элементов, сум-

марное количество которых не должно превышать 2 %, что позволит сохранить электропроводность не ниже 50 % от меди и прочность в пределах 260—270 МПа.

2. Технология с использованием СИТ позволила получить образцы с более высокими показателями электропроводности (до 53—55 % от электропроводности меди) и прочности (до 430 МПа) в сравнении с технологией, в которой используется воздействие ИМП.

3. Образцы, подвергнутые воздействию ИМП, хотя и имеют заниженные на 6—8 % показатели по электропроводности и на 30 % по прочности, обладают более высокими значениями пластичности. Их относительное удлинение в 1,5 раза выше, чем у образцов, полученных с воздействием СИТ.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2327755 (РФ). Сплав на основе алюминия / Ю.А. Щепочкина. Заявл. 02.04.2008. Опубл. 27.06.2008.
2. Пат. 2333994 (РФ). Сплав на основе алюминия / Ю.А. Щепочкина. Заявл. 09.01.2007. Опубл. 20.09.2008.
3. Пат. 2352665 (РФ). Сплав на основе алюминия / Ю.А. Щепочкина. Заявл. 26.11.2007. Опубл. 20.04.2009.
4. Пат. 2394113 (РФ). Высокопрочный деформируемый сплав на основе алюминия и изделия из него / ООО «Интел-Сервис». Заявл. 13.11.2008. Опубл. 10.07.2010.
5. Пат. 2478131 (РФ). Термостойкий литейный алюминиевый сплав / Н.А. Белов, В.Д. Белов, А.Н. Алабин, С.С. Мишуров. Заявл. 29.10.2010. Опубл. 27.03.2013.
6. Пат. 2446222 (РФ). Термостойкий сплав на основе алюминия и способ получения из него деформированных полуфабрикатов / Н.А. Белов, А.Н. Алабин. Заявл. 29.10.2010. Опубл. 27.03.2012.
7. *Тыванчук А.Т., Янсон Т.И., Котур В.Я.* и др. // Изв. АН СССР. Металлы.1988. № 4. С. 187.
8. Pat. 2012230862 (USA). Aluminium foil alloy / A.D. Howells. 2012.
9. Pat. 102758109 (China). High-strength wear-resisting heat-resisting aluminium alloy material and preparation process thereof / Qi Zeng. 2012.
10. Pat. 2644002 (China). Aluminium alloy solution refined chlorine-free slag remover / Xizhu Gao. 2012.
11. *Фридляндер И.Н., Гольдбухт Г.Е.* Алюминиевые деформированные сплавы. М.: Металлургия, 1972.
12. *Найдек В.Л., Наривский А.В.* // Литейное пр-во. 2003. № 9. С. 2—3.
13. *Самойлович Ю.А.* Кристаллизация слитка в электромагнитном поле М.: Металлургия, 1986.
14. *Бибиков А.М., Халтурин И.П., Зарембо В.М.* // Литейное пр-во. 2007. № 5. С. 12—14.
15. *Попов И.П., Коврижных Н.И., Демьяненко Е.Г.* // Литейное пр-во. 2006. № 13. С. 25—26.