

АЛЮМИНИЕВАЯ ПРОВОЛОКА ООО «НПЦ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ» ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г.П. Усынина¹, канд. техн. наук, В.Н. Тимофеев², докт. техн. наук,
В.Ю. Конкевич³, докт. техн. наук, М.М. Мотков¹,
Н.В. Сергеев², канд. техн. наук, И.С. Гудков¹

¹ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики», г. Красноярск.

²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

³ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», г. Москва, e-mail: konkevich@mail.ru

Рассмотрены вопросы технологии изготовления непрерывно-литых длинномерных слитков $\varnothing 9$ мм, полученных методом электромагнитной кристаллизации из сплава на основе системы Al–Mg–Sc с высоким содержанием переходных металлов, и проволоки из них диаметром ~ 1 мм. Проволока будет использована вместо порошка для изготовления 3D-деталей методами аддитивного производства путем прямого энергетического воздействия лазером или электронным лучом. Использование высоколегированной проволоки в условиях быстрой кристаллизации, свойственной процессу прямого энергетического воздействия (Directed Energy Deposition), должно обеспечить изготовление деталей с повышенным уровнем механических характеристик или с особыми физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: аддитивные технологии; алюминиевые сплавы; проволока; переходные металлы; электромагнитный кристаллизатор.

Aluminium Wire of RPC «Magnetic Hydrodynamics» LLC for Additive Manufacturing. Cand. of Sc. (Eng.) G.P. Usynina¹, Dr. of Sc. (Eng.) V.N. Timopheev², Dr. of Sc. (Eng.) V.Yu. Konkevich³, M.M. Motkov¹, Cand. of Sc. (Eng.) N.V. Sergeyev², I.S. Gudkov¹.

¹RPC «Magnetic hydrodynamics» LLC, Krasnoyarsk.

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

³State Research University «MAI», Moscow, e-mail: konkevich@mail.ru

Processes for production of $\sim \varnothing 1$ mm wire from $\varnothing 9$ mm long-sized continuously cast ingots made of Al–Mg–Sc alloy with high content of transition metals made by electromagnetic solidification are discussed. The wire will be used for production of 3D parts instead of powders in the course of the directed laser or beam deposition. The usage of high-alloyed wire under the rapid solidification conditions peculiar to the directed energy deposition should ensure manufacturing parts with enhanced level of mechanical characteristics or with special physical and mechanical properties.

Key words: additive manufacturing; aluminium alloys; wire; transition metals; electromagnetic mould.

Введение

Аддитивные технологии (технологии, предполагающие изготовление изделий по данным цифровой модели или CAD-модели методом послойного добавления материала) активно развиваются во многих странах мира. По мнению ведущих мировых экспертов, аддитивные технологии являются стратегически значимыми, и именно с этим направлением связывают дальнейшее инновационное развитие всех отраслей науки и техники.

В России эти технологии пока широкого распространения не получили, однако исследования ведутся достаточно широким фронтом. Основные ее преимущества: снижение затрат и уменьшение расхода материала при доведении детали до нужных размеров, сокращение времени выхода на рынок новой продукции. Исходным материалом для аддитивных технологий сегодня являются очень дорогостоящие порошковые, в частности, алюминиевые сплавы традиционного состава. В то же время анализ условий формирования деталей по аддитивной технологии показывает, что высокая скорость охлаждения при кристаллизации позволяет достичь механических свойств, превосходящих свойства традиционных алюминиевых сплавов, соответствующих уровню гранулируемых алюминиевых сплавов [1, 2].

Разработанная в ООО «НПЦ магнитной гидродинамики» технология литья в электромагнитный кристаллизатор длинномерных слитков тонкого сечения ($\varnothing 8-12$ мм) со скоростями охлаждения быстрозакристаллизованных гранулируемых алюминиевых сплавов (10^3-10^4 °C/c) в перспективе может значительно сократить затраты на исходный материал в виде проволоки для аддитивных технологий [3–6]. В частности, проволока из алюминиевого сплава с высоким содержанием переходных металлов (ПМ) может быть использована при прямом лазерном плавлении DED-L или прямом плавлении электронным лучом (DED-EB), относящимся к классу технологий Direct Energy Deposition (DED), представляющих собой прямое выращивание детали из проволоки [7]. В данной работе представлена технология изготовления и исследование длинномерных слитков $\varnothing 9$ мм, полученных методом

электромагнитной кристаллизации из алюминиевых сплавов с высоким содержанием ПМ и проволоки из них диаметром 1 мм с целью получения в ее структуре дисперсных интерметаллидных фаз для последующего лазерного плавления методами Direct Energy Deposition.

Методика исследования

Содержание легирующих компонентов в сплавах определяли методом химического анализа по ГОСТ 11739.99. Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX51. При определении размера фаз использовали систему анализа изображений SIAMS Photolab, которая работает под управлением операционных систем Microsoft Windows NT/2000/XP.

Электронно-микроскопические исследования проволоки проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM70001F с энергодисперсионным микроанализатором INCA Penta FETx3.

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

Временное сопротивление разрыву и относительное удлинение проволоки определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10446 на машине для испытаний на растяжение LFM-100 фирмы Walter + bai AG.

Изготовление слитков из сплавов Al–Mg–Sc–ПМ с высоким содержанием ПМ для аддитивных технологий

В связи с тем, что скорость охлаждения при кристаллизации слоев при селективном лазерном сплавлении (SLM) составляет около $1 \times 10^4-1 \times 10^5$ K/c, сплавы легируют аналогично легированию быстрозакристаллизованных гранулируемых алюминиевых сплавов.

Известно, что практически все гранулируемые алюминиевые сплавы содержат большое количество переходных металлов. При этом в отличие от традиционной «слитковой» технологии, где практически только скандий формирует аномально пересыщенный твердый раствор относительно высокой концентрации,

при аддитивной технологии возможно использовать как растворимые – Cr, Zr, Ti, V, Hf, так и нерастворимые компоненты Co, Ni, PЗМ, которые образуют дисперсные интерметаллиды.

В связи с этим сплавы для аддитивных технологий системы Al–Mg–Sc, исходя из термического цикла лазерного спекания, дополнительно легировали переходными металлами (ПМ) для обеспечения высокой прочности материала. Суммарное содержание ПМ, не считая скандия, составило в различных плавках от 0,45 до 0,97 %. Сплавы были приготовлены в индукционной тигельной печи с набивным тиглем и разлиты в чугунные изложницы в чушку массой 18–20 кг. Процесс получения слитка был выполнен на установке, состоящей из индукционной тигельной печи с графито-шамотным проводящим тиглем, системы дозирования и подачи расплава и электромагнитного кристаллизатора.

В индукционной тигельной печи проводилось плавление чушек и разогрев до температуры 900 °С. Расплав из тигельной печи переливали в дозирующее устройство с управлением от лазерного датчика уровня, состоящее из бетонного тигля, системы электрического прогрева бетонного тигля. Слиток диаметром 9 мм формировался в электромагнитном кристаллизаторе при скорости литья ~10 мм/с. Температура расплава, поступающего в электромагнитный кристаллизатор, контролировалась с помощью двух термопар, установленных в дозирующем устройстве, погруженных в расплав. Электромагнитный кристаллизатор включает в себя индуктор, формирующий переменное магнитное поле, необходимое для удержания жидкой фазы, и систему подачи воды для кристаллизации расплава. Напряженность магнитного поля, создаваемого индуктором, регулируется за счет изменения силы тока, пропускаемого по индуктору, и устанавливается на начальной стадии литья, исходя из визуального наблюдения за качеством формирующегося слитка. Величина напряженности магнитного поля от индуктора электромагнитного кристаллизатора составляет от 7000 до 10 000 А/м. Вода для кристаллизации подается из спрейера с отверстиями. Зона охлаждения водой начинается ниже границы твердая–жидкая фаза с условием рас-

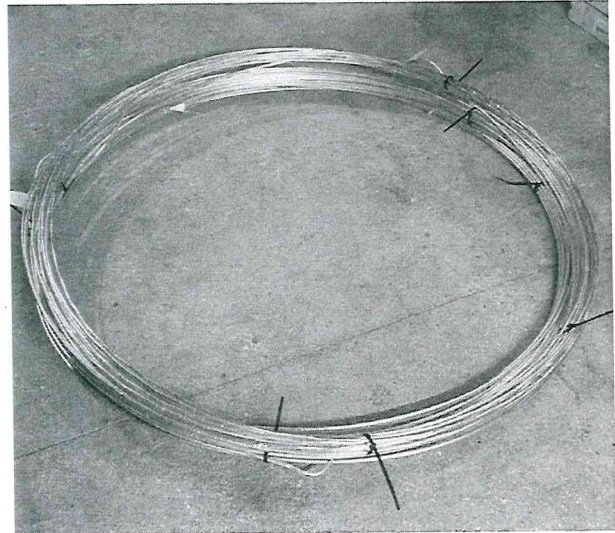


Рис. 1. Бухта слитка диаметром 9 мм

положения фронта кристаллизации в области максимума напряженности магнитного поля индуктора. Масса слитка, получаемого на установке, составляет не менее 50 кг за 1 смену. Непрерывно-литые слитки Ø9 мм сматывают в бухту диаметром 1300 мм (рис. 1).

Исследование структуры и свойств длинномерного слитка малого сечения, отлитого в ЭМК, и проволоки Ø1 мм для аддитивных технологий

Результаты исследования микроструктуры длинномерных слитков Ø9 мм системы Al–Mg–Sc с содержанием ПМ 0,45 и 0,65 %, полученных электромагнитной кристаллизацией, показали, что она характеризуется отсутствием первичных интерметаллидов при указанном достаточно высоком содержании переходных металлов. Дисперсные интерметаллиды равномерно распределены по сечению слитка. Размер частиц интерметаллидных фаз составляет 0,96–1,3 мкм (рис. 2).

Этот факт свидетельствует о значительном измельчении микроструктуры в результате высокой скорости кристаллизации слитка малого диаметра из-за интенсивной циркуляции расплава у зоны кристаллизации, что способствует увеличению градиента температур и, как следствие, теплового потока через фронт кристаллизации.

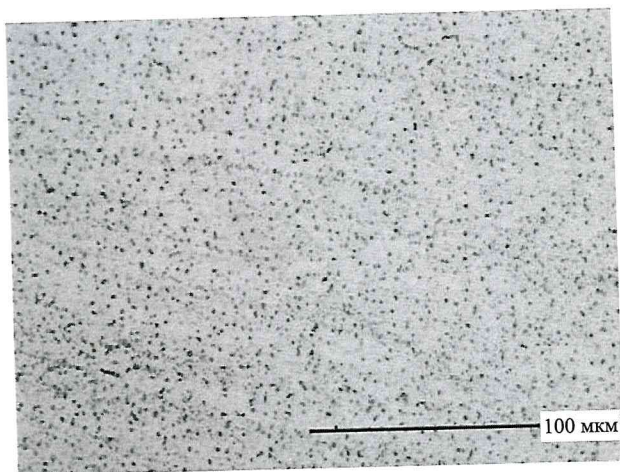


Рис. 2. Характерная микроструктура слитков Ø9 мм, полученных методом электромагнитной кристаллизации из сплава Al-Mg-Sc с содержанием ПМ 0,45 и 0,65 %

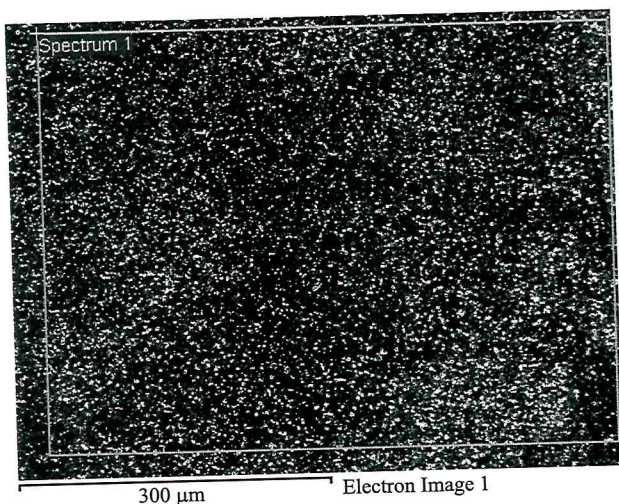


Рис.3. Электронная микроструктура проволоки Ø7 мм из сплава Al-Mg-Sc с содержанием ПМ 0,45 и 0,65 %

Ранее было установлено, что размер интерметаллидных фаз в слитках диаметром 8 мм сплава СвАМг6 уменьшается при увеличении скорости литья в электромагнитный кристаллизатор от 2 до 10 мм/с ~ в 2 раза [3].

В микроструктуре исследуемых слитков так же, как и в других из сплавов 01417, В65, не были обнаружены неметаллические включения, несмотря на то, что не осуществлялось рафинирования и фильтрации расплава. Таким образом, еще раз подтвердился факт отсутствия загрязненности сплавов шлаковыми и другими включениями при литье в ЭМК слитков малых диаметров из-за того, что весь

расплав интенсивно циркулирует в зоне кристаллизации, и существенная доля неметаллических включений выдавливается на поверхность слитка.

Механические свойства исследуемых слитков, отлитых в ЭМК, в среднем составили: предел прочности 275 МПа, предел текучести 141 МПа, а относительное удлинение 32,5 %. Такая высокая пластичность свидетельствует о том, что сформировалась структура твердого раствора.

В дальнейшем в ООО «Альянс 2008» непрерывно-литая неотожженная заготовка была подвергнута деформации в многопроходной волочильной машине до Ø0,96 мм. Технологическая пластичность при волочении оценивается удовлетворительной. Волочение проводилось с промежуточными четырьмя отжигами при температуре 450 °С. Электронно-микроскопические исследования промежуточной проволоки Ø7 мм показали, что структура состоит из дисперсных интерметаллидных частиц, равномерно распределенных в алюминиевой матрице (рис. 3). Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что в алюминиевом твердом растворе присутствует 4,83 % вес. Mg (см. таблицу).

Результаты испытаний проволоки Ø0,96 мм из сплава Al-Mg-Sc с ПМ до 0,65 % на растяжение показали, что предел прочности в результате интенсивной пластической деформации вырос до 474 МПа при относительном удлинении 10 % (рис. 4).

Таким образом, исходя из структуры полученной проволоки, можно прогнозировать, что в процессе лазерного плавления интерметаллиды расплавятся. Предварительные результаты исследований структуры проволоки, полученной оплавлением электронным

Элементный состав проволоки Ø7 мм из сплава Al-Mg-Sc с содержанием 0,45 % и 0,65 % ПМ		
Element	Weight %	Atomic %
Mg K	4,83	5,34
Al K	95,17	94,66
Totals	100,00	



Рис. 4. Внешний вид проволоки $\varnothing 0,96$ мм из сплава Al-Mg-Sc – ПМ на катушке

лучом, показали, что происходит, как правило, образование структуры твердого раствора, хотя можно наблюдать отдельные первичные интерметаллиды (рис. 5).

Вопрос состоит в том, произойдет ли в условиях DED формирование пересыщенного твердого раствора переходных металлов в алюминии и последующее дисперсионное твердение за счет его распада. Последние результаты исследований, посвященных формированию структуры при прямом лазерном осаждении порошка (процесс DMLS), показывают перспективность этого направления [8]. Вопрос выбора состава в дальнейшем будет решен путем исследования оплавленных лазером слоев из полученной проволоки. На

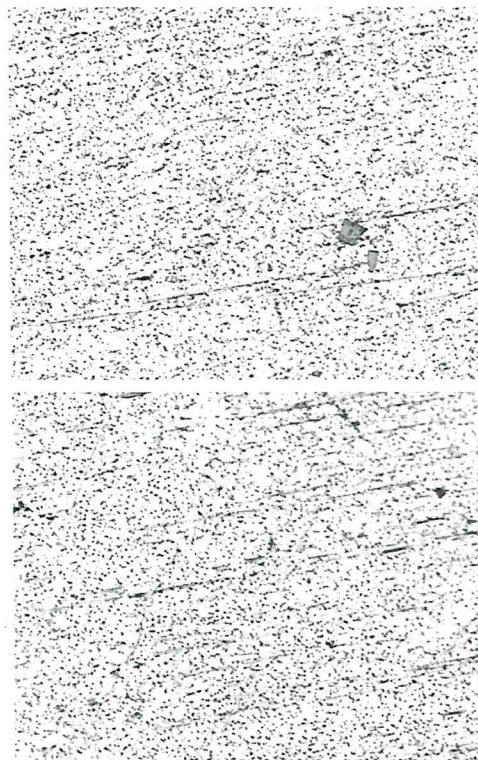


Рис. 5. Микроструктура проволоки Al-Mg-Sc-0,97 % ПМ, оплавленной электронным лучом, $\times 200$

основе полученных результатов будут разработаны предложения по совершенствованию легирования проволоки для DED и составу следующей партии проволоки.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук Н.С. Виноградову (МИТ) за помощь в проведении экспериментов по оплавлению образцов проволоки электронно-лучевой сваркой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Догадкин Н.С., Власенко А.Н., Конкевич В.Ю.** Легирование алюминиевых сплавов для аддитивных технологий // Тезисы докл.: XLII Гагаринские чтения – 2016. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016, 12–15 апреля. Т. 3. С. 511–512.
2. **Власенко А.Н., Мешков Д.А., Предко П.Ю., Конкевич В.Ю.** Перспективы применения аддитивной технологии для получения деталей из алюминиевых сплавов со специальными свойствами // Тезисы докл.: Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». – М.: МАИ, 2016, 14–18 ноября. С. 489–500.
3. **Гецелев З.Н. и др.** Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. – М.: Metallurgia, 1983. – 152 с.
4. **Добаткин В.И., Елагин В.И.** Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Metallurgia, 1983. – 176 с.
5. **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. С. 76–82.
6. **Тимофеев В.Н., Усынина Г.П., Мотков М.М., Гудков И.С.** Изготовление заклепочной проволоки из заготовки, полученной из сплава В65 методом электромагнитной кристаллизации // Цветные металлы. 2019. № 3. С. 76–82.
7. **Мешков Д.С., Предко П.Ю., Ткачев В.В., Конкевич В.Ю., Куныавская Т.М.** Перспективы применения проволоки с высоким содержанием переход-

ных металлов для аддитивной технологии // Тезисы докл.: XLIII Гагаринские чтения – 2017. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017, 5–19 апреля. С. 277–278.

8. **Tocci M., Pola A., Girelli L., Lollo F., Montesano L., Gelfi M.** Wear and Cavitation Erosion Resistance of an AlMgSc Alloy Produced by DMLS // *Metals*. 2019. № 9. P. 308. doi:10.3390/met9030308.

REFERENCES

1. **Dogadkin N.S., Vlasenko A.N., Konkevich V.Yu.** Legirovanie alyuminievykh splavov dlya additivnykh tekhnologiy // *Thesisy dokladov: XLII Gagarinskie chteniya – 2016.* – М.: Moskovskiy aviatsionnyi institut (natsionalnyi issledovatel'skiy universitet). April 12–15, 2016. V. 3. S. 511–512.
2. **Vlasenko A.N., Meshkov D.A., Predko P.Yu., Konkevich V.Yu.** Perspektivy primeneniya additivnoi tekhnologii dlya polucheniya detalei iz alyuminievykh splavov so spetsialnymi svoystvami // *Thesisy dokladov mezhdunarodnoy konferentsii «Aviatsiya i kosmonavtika – 2016* – М.: MAI. November 14–18, 2016. S. 489–500.
3. **Getselev Z.N. i dr.** Nepreryvnoe lit'yo v elektromagnitnyi-kristallizator. – М.: Metallurgiya, 1983. – 152 S.
4. **Dobatkin V.I., Elagin V.I.** Granuliruemye alyuminievye splavy. – М.: Metallurgiya, 1983. – 176 S.
5. **Avdulov A.A., Usynina G.P., Sergeyev N.V., Gudkov I.S.** Otlichitel'nye osobennosti struktury i svoystv dlinnomernykh slitkov malogo secheniya iz alyuminievykh splavov otlitykh v elektromagnitnyi kristallizator // *Tsvetnye metally*. 2017. № 7. S. 73–77.
6. **Timopheev V.N., Usynina G.P., Motkov M.M., Gudkov I.S.** Izgotovlenie zaklyopochnoi provoloki iz zagotovki poluchennoi iz splava V65 metodom elektromagnitnoi kristallizatsii // *Tsvetnye metally*. 2019. № 3. S. 76–82.
7. **Meshkov D.S., Predko P.Yu., Tkachyov V.V., Konkevich V.Yu., Kunyavskaya T.M.** Perspektivy primeneniya provoloki s vysokim soderzhaniiem perekhodnykh metallov dlya additivnykh tekhnologiy // *Thesisy dokladov: Thesisy dokladov: XLIII Gagarinskie chteniya – 2017.* – М.: Moskovskiy aviatsionnyi institut (natsionalnyi issledovatel'skiy universitet). April 5–19, 2017. S. 277–278.
8. **Tocci M., Pola A., Girelli L., Lollo F., Montesano L., Gelfi M.** Wear and Cavitation Erosion Resistance of an AlMgSc Alloy Produced by DMLS // *Metals*. 2019. № 9. P. 308. doi:10.3390/met9030308.