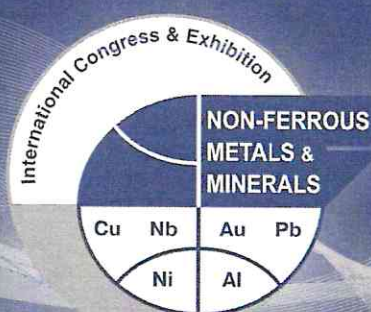


# Сборник докладов

одинадцатого международного конгресса

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И МИНЕРАЛЫ

Председатели Оргкомитета Конгресса:  
акад. РАН, проф., д.т.н. А.И. Холькин  
проф., д.х.н. П.В. Поляков  
проф., д.г.-м.н. В.А. Макаров



Krasnoyarsk  
Russia

# 2019

## Book of papers

of the eleventh international congress

## NON-FERROUS METALS & MINERALS

Congress Organizing Committee Chairmen:  
Anatoliy I. Kholkin  
Peter V. Polyakov  
Vladimir A. Makarov



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*В.Ю. Конкевич<sup>1</sup>, Г.П. Усынина<sup>2</sup>, В.Н. Тимофеев<sup>3</sup>, М.В.Первухин<sup>3</sup>,  
М.М. Мотков<sup>3</sup>, П.Ю. Предко<sup>4</sup>, И.С. Гудков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики»,  
г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>4</sup> ОАО «ВИЛС», г. Москва, Россия

## USAGE OF ELECTROMAGNETIC CRYSTALLIZATION TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF HIGHLY ALLOYED ALUMINUM WIRE FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

*V.Yu. Konkevich, G.P. Usynina, V.N. Timofeev, M.V. Pervukhin, M.M. Motkov,  
P.Yu. Predko, I.S. Gudkov*

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia

### Abstract

The development of the field of additive technology, which is called «Direct deposition», requires the development of an efficient material, the use of which can provide 3D parts with an increased set of physico-mechanical characteristics. Regarding aluminum alloys, such materials include alloys with a high content of transition metals. The paper presents the results of a comparative study of the structure of the deposited layers obtained using wires made of aluminum alloys with a high content of transition metals (TM) obtained by various technologies: by pressing from thin (~ 90 mm) semi-continuous casting, by pressing from granules obtained by vibration casting, and by dragging continuously cast lengthy ingots Ø8-9mm, obtained by the method of electromagnetic crystallization. It is shown that the application of the technology of electromagnetic crystallization of the Al-Mg-Sc-TM (REM) alloy allowed to disperse and evenly distribute the intermetallic phases of transition metals in the matrix, and, as a result, to ensure the formation of a supersaturated solid solution in the processes of direct laser and electron melting curing which will allow to obtain a high level of mechanical characteristics of the 3D part.

Применение различных методов аддитивной технологии (АТ) для производства пространственных 3D деталей путем послойного их построения в соответствии с компьютерной цифровой моделью позволяет кардинально изменить производственный процесс. При АТ можно избежать изготовления дорогого инструмента, вместо сложных дорогих штампов, сложных литейных форм, большого количество технологических операций, можно изготавливать деталь в одну ступень, без сопутствующих операций резки, сверления, без предварительного изготовления заготовок в виде листов, труб и т.п. Кроме того при изготовлении сложных пространственных изделий может быть значительно уменьшено количество деталей, которые необходимо использовать при сборочной операции. Аддитивные технологии в настоящее время рассматриваются как новый метод создания и производству ответственных компонентов для авиации, медицины, энергетики, автомобилестроения.

Кроме расширения возможностей формообразования, применение АТ позволяет существенно изменить условия формирования структуры металла 3D деталей. Исследование микроструктуры 3D деталей показало, что, например, в результате селективного лазерного плавления (SLM, SLS) деталей из алюминиевого сплава формируется слой с размером дендритного



параметра около 1 мкм. Это позволяет оценить скорость охлаждения при кристаллизации 3D детали на уровне  $1 \times 10^4 \dots 1 \times 10^5$  К/с [1].

В работах В.И.Елагина, В.И.Добаткина [2] было показано, что особенно эффективно влияет высокая скорость охлаждения на свойства алюминиевых сплавов с высоким содержанием переходных металлов. В ВИЛСе, в сотрудничестве с другими учебными и научно-исследовательскими институтами СССР, был создан новый класс алюминиевых сплавов – гранулируемые алюминиевые сплавы с высоким содержанием переходных металлов (ПМ). За счет формирования устойчивого аномально-пересыщенного твердого раствора растворимых (Zr, Cr, Sc и др.) переходных металлов в алюминии, либо за счет диспергирования фаз нерастворимых переходных (Fe, Ni, Co) и редкоземельных металлов удалось не только существенно повысить прочность сплавов на основе традиционных систем легирования (Al-Mg, Al-Zn-Mg-Cu и др.), но и создать оригинальные гранулируемые сплавы с особыми физическими свойствами – 01419 (системы Al-Mn-Cr-Zr-Ti-V), 01417 (системы Al-Zr-PЗМ), 01415 (Al-PЗМ) и др [3].

Алюминиевые сплавов для аддитивной технологии должна быть, очевидно, близки по своей природе к гранулируемым сплавам [4]. Применение сплавов с высоким содержанием переходных металлов для аддитивного производства должно обеспечить получение наноструктурированных 3D деталей с уровнем свойств на 30-50 % превосходящих свойства алюминиевых сплавов, изготавливаемых с использованием традиционной технологии литья. В данной работе были рассмотрены вопросы получения проволоки для применения в аддитивном производстве, процессах называемых Direct Deposition.

#### **Способы получения сварочной проволоки с высоким содержанием переходных металлов**

Изготовление проволоки из алюминиевых сплавов с высоким содержанием переходных металлов для сварки, наплавки, для аддитивной технологии требует использование технологических приемов, обеспечивающих формирование в конечном продукте (сварном шве, наплавленном слое, 3D детали) структуры аномально пересыщенного твердого раствора, отсутствия грубых первичных интерметаллидов. На рисунке 1 показана структура слитка диаметром 90мм из сплава Св1537 (таблица 1), содержащего около 1,5% переходных металлов (Cr, Zr, Ti, V), проволоки, полученной из этого слитка и сварного шва, выполненного с использованием этой проволоки.

Таблица 1.

Al	Mg	Mn	Cr	Zr	Ti	V
осн	3,4	0,6	0,35	0,65	0,2	0,2

Анализ микроструктуры показывает, что в процессе деформации слитка произошло измельчение первичных интерметаллидов, однако при аргонодуговой сварке интерметаллиды не успели расплавиться и остались в сварном шве.

Измельчение первичных интерметаллидов (либо их растворение) можно достичь за счет технологии гранульной металлургии. Однако применение мелких гранул способствует формированию интенсивной пористости сварного шва. Избежать пористости или, по крайней мере, минимизировать ее появление, возможно, за счет использования для изготовления проволоки, гранул, полученных вибрационным методом, рис. 2а. Достаточно большой размер гранул (~6...10 мм) способствует резкому уменьшению количества поверхностного оксида, а высокая скорость охлаждения (~ $5 \times 10^2$  К/с) способствует формированию структуры пересыщенного твердого раствора или дисперсных, менее 1-2 мкм, первичных интерметаллидов (рис. 2б, 2в).

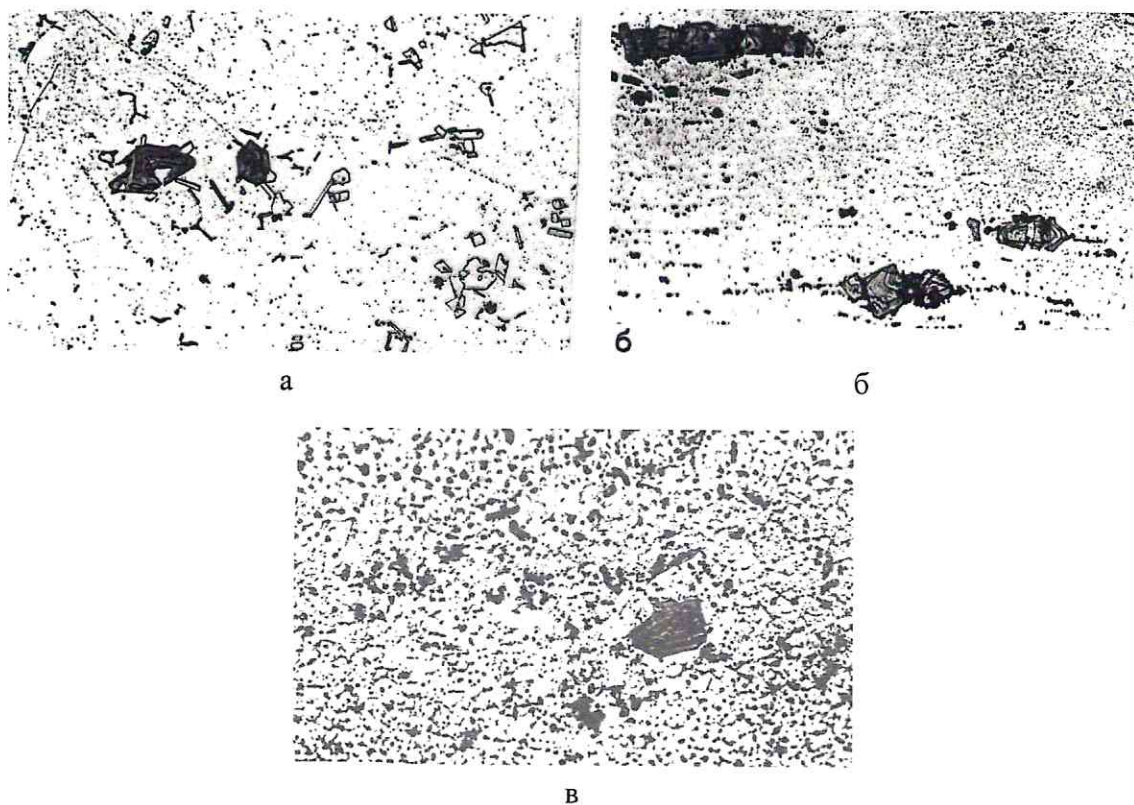


Рис. 1. Микроструктура слитка 90 мм (а), проволоки (б) и сварного шва, выполненного аргонодуговой сваркой (в). x250

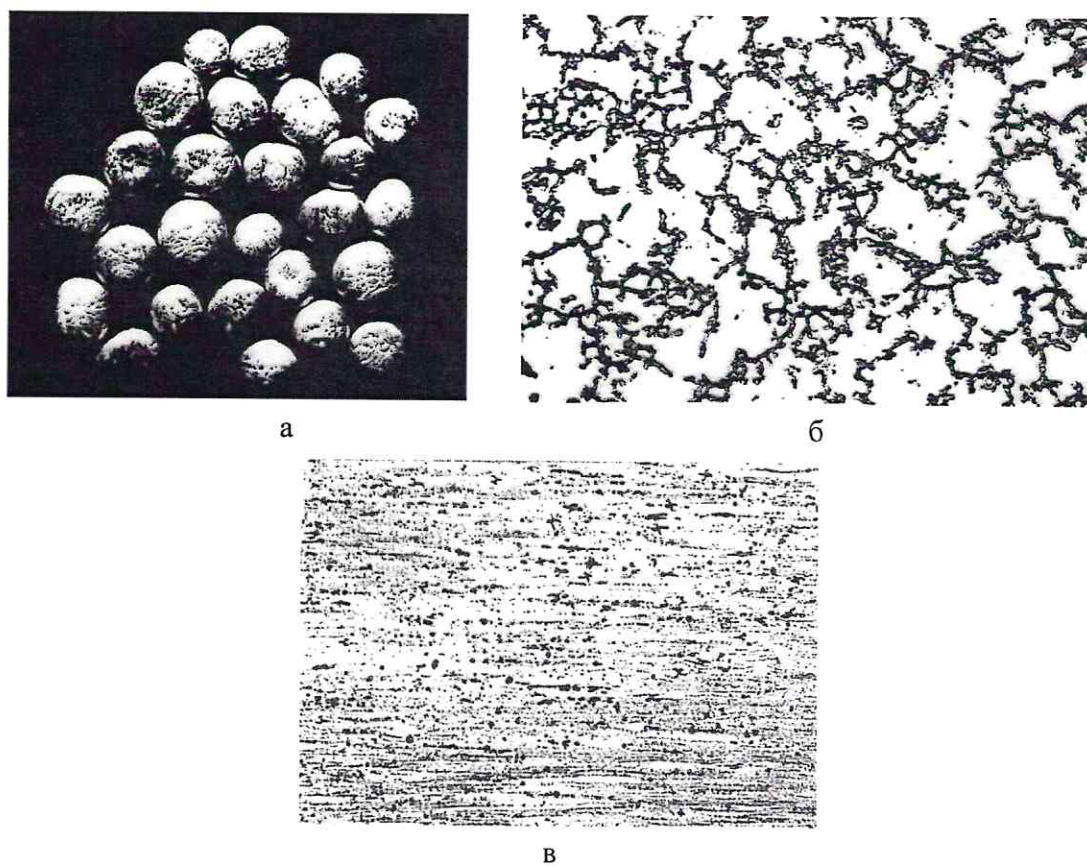


Рис. 2. Внешний вид (а) и микроструктура гранул (б) и проволоки (в), полученной из гранул сплава 1537. x250



В целом, использование проволоки Св1537, изготовленной из крупных гранул, позволило получить структуру сварного шва, выполненного аргонодуговой сваркой, без первичных интерметаллидов. Недостатком данного способа производства проволоки является достаточно высокая трудоемкость (необходимо обеспечить сушку гранул после литья в воду, дегазацию гранул, компактирование и т.д.)

### **Литье в электромагнитный кристаллизатор тонкого длинномерного слитка**

Разработанная в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» технология литья в электромагнитный кристаллизатор длинномерных слитков тонкого сечения ( $\varnothing$  8-12мм) обеспечивает воздействие магнитного поля на все сечение слитка, а не только на его поверхность, обеспечивает интенсивную циркуляцию расплава у зоны кристаллизации, что способствует увеличению градиента температур и, как следствие, увеличению величины теплового потока через фронт кристаллизации. Таким образом в тонком слитке обеспечивается получение структуры аналогичной структуре, полученной со скоростями охлаждения при кристаллизации около 103-104 К/с. Поэтому данная технология является перспективной для изготовления проволоки с высоким содержанием переходных металлов, являясь менее затратной по сравнению с технологией гранулирования.

Для оценки закономерностей формирования структуры алюминиевых сплавов при изготовлении тонких слитков, в «НПЦ Магнитной гидродинамики» было проведено изготовление сплавов системы Al-Mg-Sc- ПМ с суммарным содержанием, переходных (не считая Sc), и редкоземельных металлов (Zr, Hf, Ce) от 0,46 до 1% масс,

Технологический регламент получения слитков был следующий [5]:

– Сплавы были приготовлены в индукционной тигельной печи с набивным тиглем и разлиты в чушку весом 18-20 кг заливкой в чугунные изложницы. 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 производилось плавление чушек и разогрев расплава. Расплав из тигельной печи переливали в дозирующее устройство, представляющее собой систему, состоящую из бетонного тигля, системы электрического прогрева бетонного тигля, дозирующего устройства с управлением от лазерного датчика уровня. Слиток диаметром 8-10 мм формировался в электромагнитном кристаллизаторе при различной скорости литья. 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 10000 А/м.

Вода для кристаллизации подается из спрейера с отверстиями. Зона охлаждения водой начинается ниже границы «твердая-жидкая» фаза с условием расположения фронта кристаллизации в области максимума напряженности магнитного поля индуктора.

В результате литья были получены непрерывные слитки, пластичность которых позволила сматывать их в бухту диаметром 1300 мм (рис.3).



а



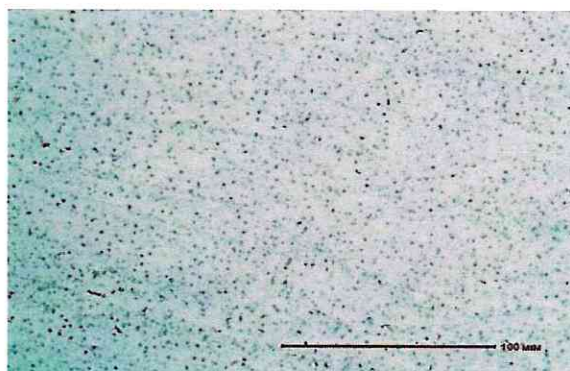
б

Рис. 3. Слиток диаметром 9мм из сплава Al-Mg-Sc-ПМ  
а – бухта диаметром 1300мм, б – внешний вид.

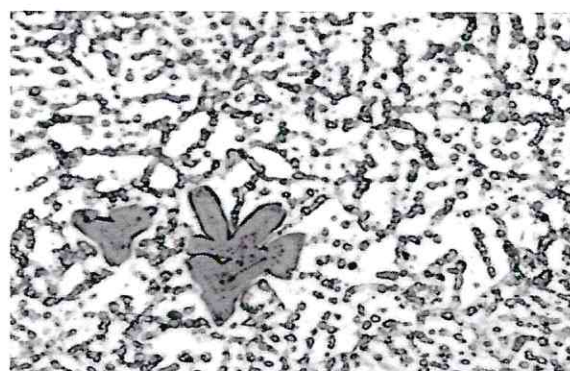
#### Микроструктура и механические свойства слитка и проволоки, полученной из него.

Результаты исследования микроструктуры длинномерных слитков  $\varnothing 9$  мм из сплавов Al-Mg-Sc с содержанием ПМ 0,45%; 0,65%, 0,94, полученных электромагнитной кристаллизацией, показали (рис. 4.а), что она характеризуется почти полным отсутствием грубых первичных интерметаллидов, несмотря на достаточно высоком содержании переходных металлов. Дисперсные интерметаллиды равномерно распределены по сечению слитка. Размер частиц интерметаллидных фаз составляет 0,96-1,3 мкм (рис.4).

Отдельные первичные интерметаллиды, (рис.4б), которые можно наблюдать на отдельных шлифах, судя по их морфологии, представляют из себя фазы, нерастворившиеся при плавлении лигатуры.



а



б

Рис. 4. Микроструктура слитка  $\varnothing 9$ мм из сплава Al-Mg-Sc-ПМ.  
а –  $\times 200$ , б – первичный интеметаллид,  $\times 450$

Непрерывно литая заготовка показала удовлетворительную технологичность при волочении. Из слитка была получена проволока диаметром 1 мм. Интерметаллидные частицы равномерно распределяются по матрице сплава.

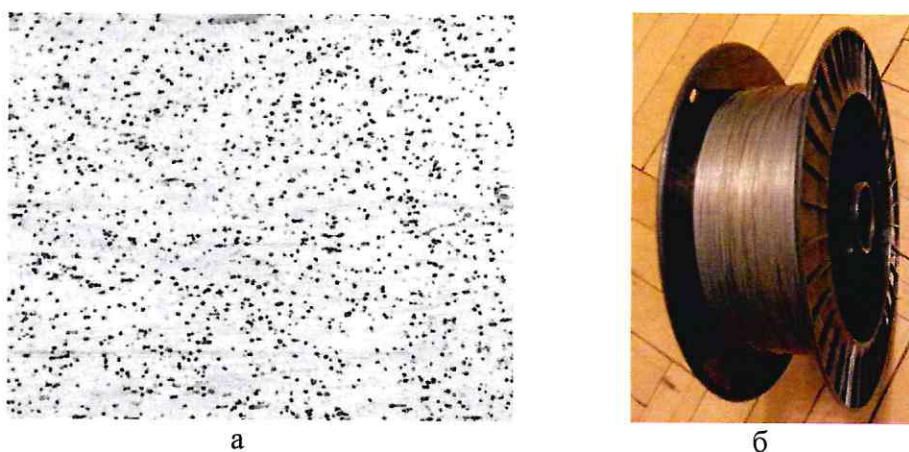


Рис. 5. Микроструктура (а) и бухта (б) проволоки диаметром 1 мм из сплава Al-Mg-Sc-ПМ

Анализ механических свойств проволоки с различным содержанием переходных металлов показывает, таблица 2, что в отожженном состоянии проволоки всех составов обладает удовлетворительной пластичностью и, соответственно, удовлетворительной технологичностью при использовании на установках для лазерной, электроннолучевой и дуговой сварки.

Таблица 2

№ пп	Испытываемый материал	Состояние	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %	Примечание
1	Слиток	литое	275	141	32,5	Среднее значение
2	Проволока – 1	нагартованное	462	334	10	
3		отожженное	359	265	17	
4	Проволока – 2	нагартованное	420	304	10	
5		отожженное	332	245	17	
6	Проволока – 3	нагартованное	380	275	12	
7		отожженное	318	235	15	
8	Проволока – 4	нагартованное	474	343	10	
9		отожженное	359	265	16	

#### Опробование проволоки, полученной из длинномерного слитка, оплавлением электронным лучем

Процессы аддитивного производства, связанные с прямым осаждением (наплавкой) существенно отличаются по энергетическому воздействию, условиями кристаллизации, по формированию напряжений, производительности процесса и т.д. Так, например, считают что напряжения, которые формируются в процессе лазерного оплавления существенно выше, чем при электроннолучевой наплавке, а с точки зрения производительности процесса наиболее эффективной является дуговая наплавка. Поэтому, очевидно, выбор состава проволоки для технологии прямого энергетического плавления (Directed Energy Deposition) будет зависеть от конкретных условий наплавки, размера деталей и т.п. Именно поэтому в стандарте ASTM процессы разделяют по виду источника нагрева – DED-L (лазерный), DED-EB (электроннолучевой), DED-GMA (дуговой) [6].



Нами была проведена оценка формирования структуры проволоки при оплавлении электроннолучевой сваркой. Оплавление проводилось на различных режимах. Анализ микроструктуры оплавленного слоя показал, что условия кристаллизации при электроннолучевом воздействии на проволоку, изготовленную с применением технологии электромагнитного литья, позволяют получить структуру пересыщенного твердого раствора, рис.6а, однако при неоптимальных режимах оплавления возможно образование первичных интерметаллидов, рис.6 б.

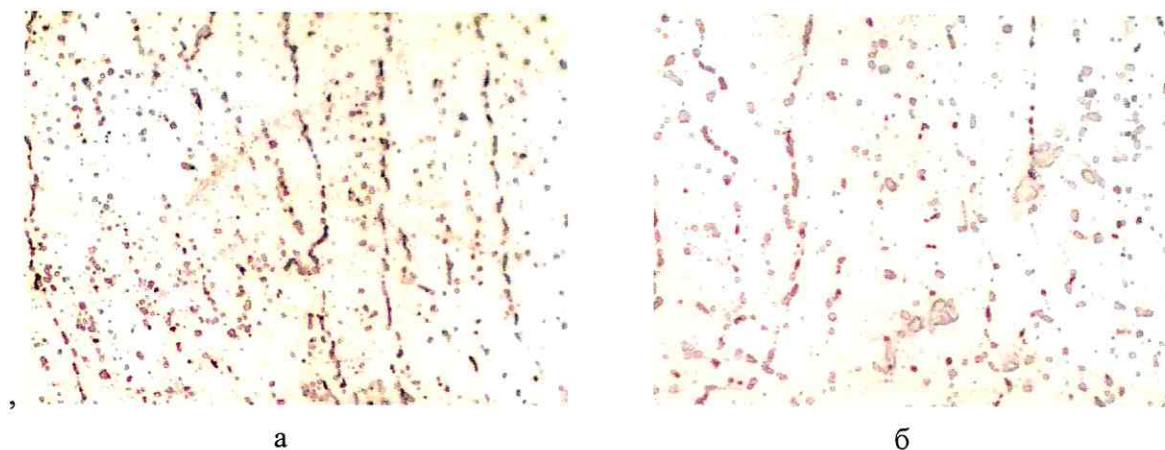


Рис. 6. Микроструктура оплавленного электроннолучевой сваркой слоя с использованием проволоки полученной с использованием электромагнитного литья.

а – режим оплавления  $U = 60$  кВ,  $I_{св} = 5$  мА,  $V_{св} = 8,3$  м/ч,  $\times 450$

б – режим оплавления  $U = 60$  кВ,  $I_{св} = 5$  мА,  $V_{св} = 6$  м/ч.  $\times 450$

### Заключение

Использование технологии электромагнитной кристаллизации для производства длинномерных тонких слитков из алюминиевых сплавов с высоким содержанием переходных металлов, позволяет получить новый инновационный материал, «проволоку с высоким содержанием переходных металлов», для применения в технологии аддитивного производства методами прямого энергетического осаждения (Directed Energy Deposition). Использование указанной проволоки позволит создать детали и конструкции из алюминиевых сплавов с уровнем прочностных свойств, превосходящим свойства традиционных алюминиевых сплавов, а также со специальными физическими свойствами. Кроме того, применение проволоки с высоким содержанием переходных металлов для создания 3D деталей позволяет совместить упрочняющее высокотемпературное старение (за счет дисперсионного твердения в результате распада твердого раствора) и снятие напряжений, образовавшихся в результате аддитивного процесса.

### Благодарности

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 №18-48-242023: «Исследование динамических характеристик турбулентных течений расплава при электромагнитной кристаллизации и влияния ее на структуру и свойства непрерывно-литых заготовок малого сечения из новых алюминиевых сплавов для производства тонкой проволоки авиационно-космического назначения».





## ЛИТЕРАТУРА

1. Redkin I., Mann V., Krokhin A., Alabin A., Zmanovskiy S., Konkevich V. Evolution of Aluminum Alloys Structure at Production Phases of 3D Products by Methods of Additive Technologies. *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, The Minerals, Metals & Materials Series*,
2. Добаткин В.И., Елагин В.И. *Гранулируемые алюминиевые сплавы*. М.: Metallurgy, 1983. 176 с.
3. Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. *Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы*. М.: ВИЛС, 1995. 340 с.
4. Догадкин Н.С., Власенко А.Н., Конкевич В.Ю. Легирование алюминиевых сплавов для аддитивных технологий. *Сборник тезисов докладов: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*, 2016, Т.3, 511-512.
5. Усынина Г.П., Тимофеев В.Н., Конкевич В.Ю., Мотков М.М., Сергеев Н.В., Гудков И.С., Алюминиевая проволока ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» для аддитивных технологий, *Технология легких сплавов*, 2019, №2, 29-34.
6. Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM Int 2013; F2792–12a.