

3. Ничипоренко, О. С. Распыленные металлические порошки / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – К. : Наук. думка, 1980. – 240 с.

4. Гессингер, Г. Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов / Г. Х. Гессингер. – Челябинск : Металлургия, 1988. – 320 с.

PRODUCTION BY MELT SPRAYING OF SPHERICAL POWDERS BASED ON ALLOYS OF Fe–Cr–Co AND Al–Ni–Cu–Co–Fe SYSTEMS FOR MAKING PERMANENT MAGNETS AT SELECTIVE LASER FUSION PLANTS

E. A. Samodelkin, V. N. Klimov, P. A. Kuznetsov

NRC «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey», St. Petersburg, Russia

Influence of process parameters (nozzle pressure, time and temperature of melt overheating) of production of spherical powders based on system alloys was investigated.

Fe–Cr–Co and Al–Ni–Cu–Co–Fe per granulometric composition of the obtained powder. Opti-mized melt spraying process to maximize the yield of up to 80 µm fraction powder required for use in selective laser fusion installations in the construction of complex permanent magnet cores.

УДК 621.762

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ АО «КОМПОЗИТ»

Ж. А. Сентюрина, А. И. Логачева, М. С. Гусаков, И. А. Логачев

*АО «Композит», г. Королев, Россия, тел.: 8-(495)-513-23-89,
e-mail: info@kompozit-mv.ru*

В докладе представлены направления развития АО «Композит» в области технологий аддитивного производства, в том числе, получение и аттестация порошков титановых, никелевых и интерметаллидных сплавов, разработка 3D-оборудования и технологий послойного синтеза, исследование микроструктуры и свойств аддитивной продукции, операции термической и механической постобработки изделий, разработка нормативной и технической документации.

За последние несколько лет в России произошел стремительный рывок в развитии аддитивных технологий (АТ), позволяющих создавать изделия по данным электронной геометрической модели путем послойного сплавления порошковых материалов высокоэнергетическим источником. Многие российские компании работают в направлениях импортозамещения материалов для АТ, а также разработки технологий аддитивного производства и оборудования для их реализации. В частности, АО «Композит» – ведущее материаловедческое предприятие ГК «Роскосмос» – реализует работы в области АТ по следующим направлениям:

- разработка промышленных технологий изготовления порошковых материалов, удовлетворяющих требованиям АТ, в том числе из новых высокотемпературных материалов;
- разработка отечественного аддитивного оборудования;
- отработка режимов послойного синтеза для распространенных в отрасли металлических материалов (жаропрочных никелевых сплавов, титановых и алюминиевых сплавов);
- разработка технологий аддитивного производства для новых перспективных высокотемпературных материалов – сплавов на основе интерметаллидов и др.;
- разработка комплексных аддитивных технологий;
- исследование свойств материалов, полученных по технологиям АТ;
- постобработка изделий, полученных по технологиям АТ;
- разработка базы нормативно-технической документации.

Исходными материалами для реализации большинства металлических АТ являются сферические порошки, от качества которых во многом зависит стабильность производственного процесса и качество конечной детали. Для производства сферических порошков АО «Композит» использует установки плазменного центробежного распыления, которые позволяют получать

порошки перспективных никелевых сплавов (ЭП741НП, АЖК, НГК6, ЧС57, ЖС6У, In718 и др.), титановых сплавов (BT1-0, BT1-00, BT6, BT6с, BT14, BT20, BT25У, OT4 и др.) и интерметаллидных сплавов (на основе TiAl, Ti₃Al, NiAl, Ni₃Al, NbAl и др.). На предприятии имеется четыре установки центробежного распыления, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технологическая база АО «Композит» для получения порошков

Тип установки	Перерабатываемые материалы	Мощность плазматрона, кВт	Частота вращения электрода*, об/мин	Производительность**, т/год
УЦР-2	Титан и титановые сплавы	120	< 22000	15
УЦР-6К	Никель, ниобий, хром, молибден и сплавы на их основе	120	< 22000	30
УЦР-9Т	Титан и титановые сплавы	160	< 35000	40
УЦР-9К	Интерметаллидные сплавы	160	< 35000	40

* Для электрода диаметром 55 мм;

** Не менее указанного значения при односменном режиме работы.

В табл. 2 приведены основные характеристики получаемых порошковых материалов. На все производимые порошки разработаны нормативные документы (технические условия), позволяющие использовать их при промышленной реализации различных типов аддитивных процессов. Форма частиц – сферичная.

Таблица 2. Основные характеристики порошков, получаемых в АО «Композит»

Состав	Никелевые сплавы	Титановые сплавы	Интерметаллиды
Основные рабочие фракции, мкм	20–63	40–100	40–150
	40–100	40–150	40–250
	40–150		
Содержание O ₂ , мас.%	не более 0,007	не более 0,2	0,07–0,2
Текучность, с	12–16*	25–30*	14–30**

* В зависимости от фракции;

**В зависимости от состава и фракции.

В области разработки оборудования для АТ особенно перспективны проекты по созданию эффективного, комплексного аддитивного производства, включающего модульную схему расположения высокотехнологичного оборудования. Так, АО «Композит» в рамках ОКР «СЛС» в 2014–2018 гг. совместно с ПАО «Электромеханика» и ФГУП «НПО «Техномаш» разработан и изготовлен опытный образец стенда послойного лазерного сплавления. Отличительной особенностью стенда является его возможность решать полный комплекс задач по организации полноценного производственного участка, позволяющего реализовывать весь спектр технологических переделов, от получения порошка и выращивания детали до ее конечной механической и термической обработки. Помимо установки для СЛС стенд включает в себя дополнительные модули, такие как система восстановления порошка, классификатор порошков, ленточнопильный блок для срезания деталей с плиты построения, плоскошлифовальный блок для подготовки плит построения, эрозионный блок, станок для финишной обработки деталей с повышенной точностью, 3D-сканер для контроля геометрии изготовленных деталей, блок неразрушающего контроля для выявления внутренних дефектов (трещин, пор, несплавлений) в материале изделия.

Основные параметры разработанной установки СЛС, входящей в состав стенда, приведены в табл. 3. Отличительными технологическими возможностями установки являются увеличенные габариты зоны построения, возможность вакуумирования камеры и проведения существенного подогрева платформы построения для уменьшения термических напряжений в «выращиваемом» изделии и подавления процесса трещинообразования.

Другим важным направлением работ АО «Композит» является адаптация отечественных порошковых материалов под зарубежные аддитивные установки, а также разработка технологических режимов послойного синтеза. На сегодняшний день осваиваются три основные технологии

аддитивного производства: селективное лазерное сплавление (СЛС), селективное электронно-лучевое сплавление (СЭЛС) и технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ). Для технологии СЛС разрабатываются режимы для изготовления изделий из линейки отечественных жаропрочных никелевых сплавов (ЭП741НП, АЖК, ЭП708 и др.). По технологии СЭЛС отработаны режимы для титановых сплавов ВТ6 и ВТ6с, ведется отработка для сплавов ВТ14 и 4822 (на основе TiAl). Широкий спектр материалов (различные никелевые и титановые сплавы) освоен для технологии прямого лазерного выращивания.

Таблица 3. Основные параметры установки СЛС-1

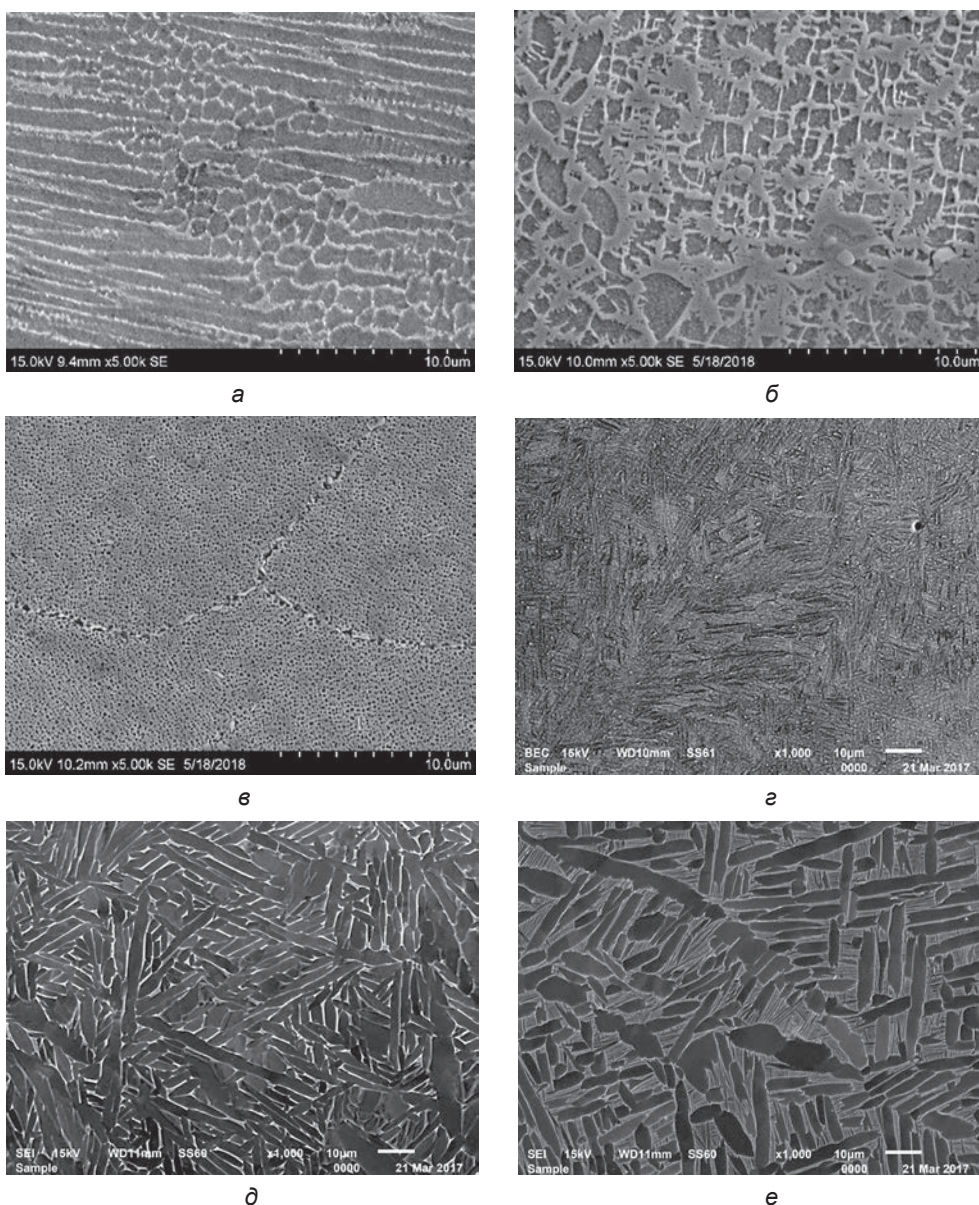
Зона построения	450×450×600 мм (по согласованию – 600×600×600, 250×250×250, 150×150×250 мм и др.)
Тип камеры	Вакуумная камера, толщина стенки – 18 мм
Источник излучения	Иттербиевый волоконный лазер, максимальная мощность 400/1000 Вт
Подогрев области построения	До 400 °С (по согласованию – до 500 °С)
Степень предварительного вакуумирования	До $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.
Габариты установки	7200×5250×3750 мм (базовый вариант)
Требования к электросети	380 В/30 кВт

Особое внимание в АО «Композит» уделяется исследованиям влияния горячего изостатического прессования (ГИП) и термической обработки (ТО) на микроструктуру и свойства аддитивных изделий. В качестве примера на рисунке представлены характерные эволюции микроструктур в процессе ГИП и ТО для никелевого жаропрочного сплава ЭП741НП, полученного методом СЛС, и титанового сплава ВТ6С, полученного методом СЭЛС. В табл. 4 и 5 приведены результаты механических испытаний для соответствующих сплавов.

Для сплава ЭП741НП наблюдается существенное увеличение прочностных характеристик после проведения каждого этапа термической постобработки. При этом увеличение прочности после ГИП реализуется за счет устранения структурных дефектов (пор, трещин и т. д.) и выделения упрочняющей γ' -фазы. Однако γ' -фаза выделяется в виде неправильных включений размером от 0,5 до 4 мкм, неравномерно распределенных в объеме материала. Проведение комплексной обработки ГИП+ТО обеспечивает максимальный уровень свойств сплава, что связано с формированием бездефектной структуры, равномерным распределением γ' -фазы размером менее 0,3 мкм. Также в ходе ГИП и ТО происходит дополнительное упрочнение границ зерен карбидными фазами, такими как $(Ti,W)C$, $(Nb,Ti)C$, $Cr_{23}C_6$ и $Cr_{21}(Mo, W)_2C_6$.

Для титанового сплава ВТ6С, полученного методом СЭЛС, наблюдается несколько иная зависимость от ГИП и ТО. Сплав ВТ6С после СЭЛС имеет двухфазную ($\alpha + \beta$)-структуру видманштеттового типа. При этом размер структурных составляющих существенно меньше структурных составляющих сплава ВТ6С в литом и деформированном состоянии, что связано с высокими скоростями охлаждения в процессе кристаллизации тонкого слоя расплава. При этом метод СЭЛС обеспечивает изготовление образцов с меньшим количеством структурных дефектов (в основном небольшие сферические поры), чем другие методы АТ. Проведение ГИП приводит к устранению остаточной пористости, но при этом способствует росту зерна и увеличению размера структурных составляющих, за счет чего после ГИП наблюдается незначительное уменьшение предела прочности материала. Проведение последующей операции ТО по типу закалка + старение приводит к формированию бимодальной структуры, состоящей из глобулярных участков α -фазы и мелкозернистых пластинчатых участков α/β -фаз, что, в свою очередь, способствует увеличению предела прочности и некоторому снижению характеристик пластичности. Можно заключить, что проведение комплексной обработки ГИП и ТО способствует формированию свойств на уровне «выращенного» состояния, однако при этом материал не содержит дефектов, которые могут оказать отрицательное влияние на длительную прочность, а также находится в структурно стабильном состоянии и может эксплуатироваться при повышенных температурах.

Таким образом, в результате высоких температурных градиентов и скоростей охлаждения материалы, полученные методом АТ, преимущественно кристаллизуются в метастабильном состоянии и характеризуются сильными термическими напряжениями, а также структурной анизотропией. Кроме того, в структуре материалов могут присутствовать дефекты в виде микропор



Эволюция структуры никелевого жаропрочного сплава ЭП741НП (а–в) и титанового сплава ВТ6С (д–е), полученных методами АТ, в процессе ГИП и ТО: а – СЛС (×5000), б – СЛС +ГИП (×5000), в – СЛС +ГИП + ТО (×5000), д – СЭЛС (×1000), е – СЭЛС +ГИП (×1000), е – СЭЛС +ГИП + ТО (×1000)

и микротрещин, которые негативно отражаются на механических свойствах материала и служебных характеристиках изделий. Проведение комплексной термической постобработки, сочетающей ГИП и ТО, способствует полному или частичному устранению структурных дефектов, а также приданию материалам стабильных эксплуатационных характеристик.

Таблица 4. Эволюция механических характеристик никелевого сплава ЭП741НП, полученного методом СЛС, в процессе последующих ГИП и ТО

Состояние образца	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение φ , %
СЛС	1083 ± 27	853 ± 16	10,5 ± 4,3	11,9 ± 4,5
СЛС + ГИП	1292 ± 25	811 ± 5	24,9 ± 1,3	19,7 ± 1,9
СЛС + ГИП +ТО	1455 ± 52	1023 ± 34	21,4 ± 6,7	17,3 ± 4
По паспорту*	1275	834	13	15

* Для образцов полученных методом ГИП в формообразующей оснастке после ТО.

Таблица 5. Эволюция механических характеристик титанового сплава ВТ6С, полученного методом СЭЛС, в процессе последующих ГИП и ТО

Состояние образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение φ , %
СЭЛС	1024 ± 10	15,9 ± 0,9	44,1 ± 3,4
СЭЛС + ГИП	955 ± 4	17,4 ± 0,2	53,6 ± 0,7
СЭЛС + ГИП +ТО	1020 ± 6	13,9 ± 10	50,6 ± 3,2
По ГОСТ 26492-85*	835–885	6–8	15–20

* Пруток в состоянии отжига.

Для успешного освоения и промышленного внедрения разработанных технологий, материалов и изделий в АО «Композит» активно проводятся работы по разработке базы нормативно-технической документации, в том числе нормативной документации на материалы для АТ и изделия, полученные методом АТ. Кроме того, в течение последних пяти лет АО «Композит» является постоянным членом технического комитета по стандартизации ТК 182 «Аддитивные технологии». В рамках ТК 182 совместно с ПАО «ОДК-Сатурн» разработан ряд национальных стандартов, устанавливающих классификацию, термины и определения дефектов металлических материалов в виде порошковых композиций и проволоки для АТ, а также изделий, полученных методами АТ. Кроме того, разработан стандарт, устанавливающий общие требования, правила приемки, методы контроля и требования к маркировке, упаковке, транспортированию и хранению изделий из титановых сплавов, изготовленных методом СЭЛС. В данный момент ведутся разработки проектов еще четырех национальных стандартов, устанавливающих требования к оборудованию и технологическим процессам аддитивного производства.

В качестве дальнейших тенденций развития АТ в ракетно-космической отрасли следует выделить следующие направления:

- разработка технологий и создание 3D-оборудования для работы в условиях невесомости и микрогравитации для автономного выращивания конструкций в космосе (концепция «Made in space»);

- разработка технологий и оборудования прямого выращивания крупногабаритных конструкций до 6000 мм из алюминиевых, никелевых и титановых сплавов для двигателей и корпусов ракет-носителей;

- разработка технологии и установок селективного электронно-лучевого сплавления для изготовления изделий из высокотемпературных порошков на основе тугоплавких металлов и интерметаллидных соединений;

- развитие технологий и создание оборудования для аддитивного производства изделий из неметаллических материалов, в том числе высокотемпературных полимеров и керамики;

- разработка технологий изготовления биметаллических и градиентных материалов методами послойного синтеза;

- разработка гибридных технологий, сочет ающих методы АТ с другими промышленными технологиями, обеспечивающими конечную геометрию изделия (механическая доводка);

- паспортизация материалов и сертификация изделий аддитивного производства с учетом особенностей ракетно-космического применения, включая воздействие факторов космического пространства.

DEVELOPMENT DIRECTIONS OF JSC «KOMPOZIT» IN THE FIELD OF ADDITIVE MANUFACTURING

Zh. A. Sentyurina, A. I. Logacheva, M. S. Gusakov, I. A. Logachev

JSC «KOMPOZIT», Korolev, Russia, e-mail: info@kompozit-mv.ru

The article presents the main directions of development of JSC «Kompozit» in the field of additive manufacturing (AM), including the production of powder materials for various types of AM, the development of AM machines, the development of additive manufacturing technologies (selective laser melting, selective electron beam melting, complex technologies) for the manufacture of complex-shape products, the study of the structure and properties of materials obtained by AM methods, the development of a database of normative-technical documentation.