

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9 (150). С.42-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (150). P.42-48.

Научная статья  
УДК 621.791.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

## **Получение композиционных материалов при аддитивном производстве**

**Александр Григорьевич Григорьянц, д.т.н.**  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия  
Mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** Представлены основные возможности получения новых композиционных материалов. Благодаря высокой динамике термодформационных процессов в расплавленной ванне тонкого слоя выращиваемой детали получаем новую структуру материала из несмешиваемых компонентов. Другим направлением получения нового композиционного материала в процессе выращивания является армирование матрицы высокопрочными элементами, которые могут присутствовать, в том числе в виде твердой фазы при расплавлении и кристаллизации материала. Это позволяет спрогнозировать заранее новые качественные свойства выращенной детали – повышение прочности, снижения массы и др. Получает развитие аддитивная технология выращивания деталей и изделий из вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и других тугоплавких металлов, плохо обрабатываемых механическими методами. При этом применяется подогрев в процессе выращивания. Успешное применение аддитивных технологий используют в медицине при изготовлении имплантов из молибдена, тантала и их сплавов, обладающих высокой биосовместимостью и отсутствием токсичности. Возникает возможность изготовления импланта, выращенного по конкретной модели для данного индивидуума. Основными направлениями развития аддитивного производства являются создание более производительных комплексов и расширение номенклатуры используемых порошков конструкционных материалов с возможностью формирования новых композиционных материалов в процессе выращивания.*

**Ключевые слова:** порошки, металлы, интерметаллиды, керамика, композиционный материал, аддитивная технология, селективное плавление

*Для цитирования:* Григорьянц А.Г. Получение композиционных материалов при аддитивном производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-42-48

## **Production of composite materials in additive manufacturing**

**Alexander G. Grigoryants, D. Eng.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
Mt12@bmstu.ru

***Abstract.** The main possibilities of obtaining new composite materials are presented. Due to the high dynamics of thermal deformation processes in the molten bath of a thin layer of the grown part, we obtain a new material structure from immiscible components. Another direction of obtaining a new composite material in the growing process is the*

*reinforcement of the matrix with high-strength elements, which can be present, including in the form of a solid phase under melting and crystallization of the material. This allows predicting in advance new qualitative properties of the grown part - increased strength, weight reduction, etc. Additive technology is being developed for growing parts and products made of tungsten, molybdenum, tantalum, niobium and other hard-melting metals that are poorly treated through mechanical methods. In this case, heating is used within growing process. The successful application of additive technologies is used in medicine in the manufacture of implants made of molybdenum, tantalum and their alloys, which have high biocompatibility and no toxic property. It becomes possible to manufacture an implant grown according to a specific model for a given individual. The main directions of the additive manufacturing development are the creation of more productive complexes and the expansion of construction materials powders range, used when forming new composite materials in the growing process.*

**Keywords:** powders, metals, intermetallides, ceramics, composite material, additive technology, selective melting

**For citation:** Grigoryants A.G. Production of composite materials in additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-42-48

На кафедре «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в «Московском центре лазерных технологий» выполняются исследования по основным технологиям аддитивного производства: селективное лазерное плавление (СЛП), в котором лазерный луч расплавляет нанесенный тонкий слой металлического порошка, и коаксиальное лазерное плавление с подачей металлического порошка соосно лазерному лучу. Наряду с технологическими исследованиями выполняются опытно-конструкторские разработки и выпуск оборудования для аддитивного производства [1].

Большое внимание в научных разработках уделяется изучению термодиффузионных процессов при расплавлении и кристаллизации, управляя которыми можно получать новые свойства материалов в процессе выращивания [2].

Благодаря смешиванию различных порошков во время технологического процесса расплавления удается получать сложные композиции с уникальными эксплуатационными свойствами. Особенность заключается в том, что при лазерном выращивании в процессе аддитивного производства, вследствие высокой динамики термодиффузионных процессов в расплаве не успевает произойти диффузионное перераспределение элементов, и образуется

микроструктура нового типа, обеспечивающая уникальные свойства изделия. Изменение состава и структуры в процессе выращивания позволяет создавать в результате аддитивного производства изделия из инновационного композиционного материала, который в условиях металлургических процессов невозможно получить вследствие отсутствия их смешивания и взаимного растворения в расплавленном состоянии. Разработка этих методов аддитивного производства предусматривает целый комплекс исследований технологических процессов, цифрового металловедения, программного обеспечения и разработки специального оборудования. Этот сложный комплекс исследований и аддитивного производства деталей и изделий сопровождается компьютерной топологической оптимизацией, обеспечивающей высокий практический результат.

В настоящее время выполнено большое количество теоретических и практических разработок, включая использование аддитивных технологий в промышленном производстве сложных и ответственных изделий [3]. Наиболее глубоко проработана технология селективного лазерного плавления основных конструкционных материалов, таких как нержавеющие и инструментальные стали, никелевые, алюминиевые, титановые и медные сплавы.

Выполнены исследования по компьютерному анализу высокодинамичных процессов нагрева и охлаждения ванны плавления. Установлен высокий градиент распределения температур в ванне плавления, достигающей порядка  $10^4$  °C/мм и высокая скорость охлаждения при кристаллизации. Благодаря этому формируется мелкозернистая структура и повышается ее химическая однородность. Вследствие этого формируются новые свойства изделия, отличающие от процессов литья,ковки,штамповки, горячей прокатки и других процессов горячей обработки.

Значительные результаты получены при выращивании изделий из порошковых материалов на основе железа Fe. Наиболее распространены порошки из аустенитных и мартенситных сталей с содержанием хрома более 15 %. При оптимизации условий выращивания получены качественные результаты без образования трещин, пор и других дефектов структуры, характеризующиеся высокой прочностью и пластичностью, и обеспечивающие коррозионную стойкость.

Для снижения склонности к образованию трещин при выращивании изделий из порошков на основе никеля разработан процесс с подогревом подложки до высоких температур ниже 700 °C.

Высокие показатели получены при выращивании изделий из кобальтовых сплавов с использованием в качестве упрочнителей карбидов. Это обеспечивает получение композиционных материалов с высоким сопротивлением ударно-абразивному и высокотемпературному износу в коррозионной среде [3].

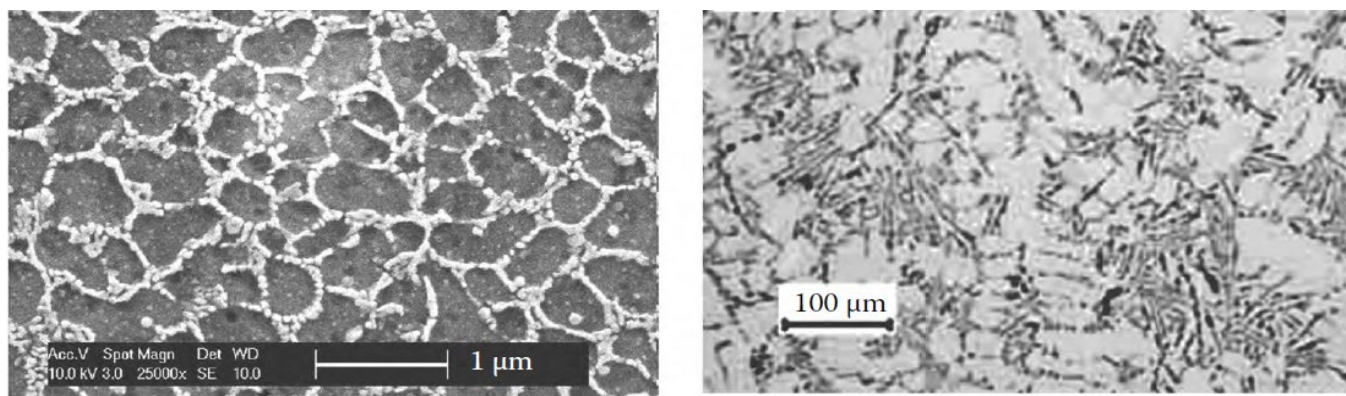
При изготовлении теплообменников аддитивными технологиями используют порошки на основе медных сплавов, обеспечивающих хорошие антифрикционные и высокие антикоррозионные свойства [4, 5].

Практический интерес представляет более сложная технология выращивания изделий,

которые состоят из слоев различного состава. Необходимо получить высококачественные соединения при отсутствии дефектов в контактных участках на стыке разнородных слоев. В качестве примера представлено получение режущего или штампового инструмента с повышенным теплоотводом за счет контакта слоев инструментальной стали и меди при выращивании детали. Прямая наплавка меди на сталь приводит к снижению прочности и износостойкости из-за диффузии меди к границам аустенитного зерна стали. Использование промежуточного слоя из сплава на никелевой основе между инструментальной сталью и медью обеспечивает высокое качество переходных зон, что позволяет получить композиционный материал инструментальная сталь – медь с высокими служебными характеристиками [3].

Наиболее широко используют в аддитивных лазерных технологиях выращивание деталей и изделий из алюминиевых сплавов. Высокое качество обеспечивает применение порошкового материала из отечественного сплава Ak9ч, который является аналогом зарубежного сплава AlSi10Mg. Однако этот порошок, как и другие на основе алюминиевых сплавов, обладает низкой сыпучестью, что препятствует нанесению тонкого слоя порошка. Следует отметить, что алюминиевые сплавы обладают высокой химической активностью. Поэтому процесс выращивания требует тщательной защиты поверхности расплавленного материала, что хорошо обеспечивается осуществлением процесса в камере с аргоном в качестве защитного газа.

Детали и узлы, полученные выращиванием из порошка Ak9ч, показывают высокие свойства. В значительной степени это достигается высокими механическими характеристиками материала, обеспечивающими мелкозернистой структурой благодаря высоким скоростям кристаллизации расплава.



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура алюминиевого сплава Ak9ч, полученная СЛП (а) и по литейной технологии (б)

Fig. 1. Microstructure of Ak9ч aluminum alloy obtained by SLM (selective laser melting) (а) and casting technology (б)

На рис. 1, а представлена характерная микроструктура алюминиевого сплава, полученная выращиванием образцов из порошков сплава Ak9ч в сопоставлении со структурой материала, полученного литейной технологией (рис. 1, б) [3]. В результате выращивания образуются мелкозернистая структура алюминия, ячейки которого окружены эвтектикой с фазой силициума Si, тогда как в структуре литого материала крупные частицы эвтектики силициума располагаются между дендритами алюминия. Благодаря этому материал, полученный выращиванием, обладает более высокими механическими свойствами по сравнению с литым материалом.

Для повышения механических свойств предложено армирование алюминиевой основы в процессе выращивания твердыми частицами карбида титана TiC, в результате чего получается новый композиционный материал с повышенной прочностью.

Проведенные испытания композиционных образцов, выращенных из порошковой смеси AK9ч и колотых частиц TiC с размером 1...10 мкм и содержанием в 1, 3, 5, 7 % масс. показывает, что концентрация TiC до 5 % практически не влияет на увеличение пористости, а при дальнейшем увеличении содержания TiC количество пор возрастает. Оптимальная концентрация TiC (5 %)

обеспечивает увеличение предела прочности на 15...20 % по сравнению с матрицей. В дальнейшем при использовании армирующих элементов с более скругленной формой следует ожидать получения еще большей результативности за счет снижения концентрации напряжений в острых углах колотых частиц. Микроструктура выращенных образцов является мелкозернистой, в том числе измельчение зерна происходит также вокруг частиц карбида титана, что связано в первую очередь с высокими скоростями охлаждения при лазерном выращивании.

Большой интерес представляет использование композиций из несмешиваемых материалов. Порошки из стали и карбида титана при их совместном расплавлении и охлаждении со скоростями порядка десятков и сотен градусов в секунду образуют границу раздела между этими двумя материалами, т. е. не удастся получить единую структуру. Однако при существенно более высоких скоростях охлаждения удастся получить единую структуру сплавленного материала. Именно этот эффект является основой для получения нового композиционного материала при лазерном выращивании смеси порошков стали и карбида титана. В качестве металлической матрицы использована сталь 14ХНЗМА (повышенная износостойкость, повышенная усталочная

прочность), в качестве фазы упрочнителя – карбид титана TiC (низкая плотность, высокая твердость, повышенная термическая стабильность, стойкость против окисления). Результаты испытаний представлены в табл. 1 для

случая содержания TiC в материале порядка 50 %, что обеспечило снижение массы детали почти на 20 % при увеличении механических свойств.

### 1. Результаты испытаний

#### 1. Test results

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	E, ГПа	HV	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_{пр}$ , МПа	T <sub>пл</sub> , К
14ХНЗМА	7,85	210	360...440	1150	1350 (растяжение)	1538
TiC	4.94	439	3200	–	2500 (сжатие)	3065
14ХНЗМА + TiC	6.29	320	860...920	1120	–	1726

Создаваемая композиция при выращивании материала из смеси порошков стали и карбида титана TiC не уступает по прочности исходной стали, но обеспечивает значительное

снижение массы композиционного материала, что является актуальной задачей при изготовлении деталей летательных аппаратов (рис. 2).

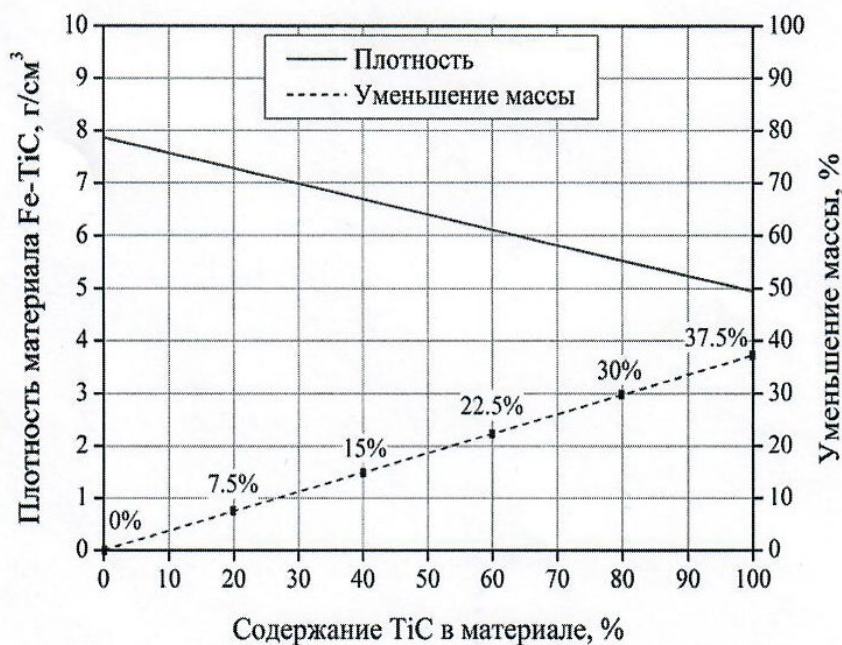


Рис. 2. Зависимость массы и плотности композиционного материала Fe-TiC от содержания TiC

Fig. 2. Dependence of the mass and density of the Fe-TiC composite material on the TiC content

Интересные результаты получены с использованием порошков TiC в сочетании с порошками никелевых сплавов [7]. Применение высокотемпературного подогрева до температуры 900 °С в сочетании с оптимизацией технологических параметров выращивания позволяет получить Ni-WC покрытия с высоким содержанием карбида вольфрама до 35%, что обеспечивает высокую жаростойкость, коррозионную стойкость и износостойкость.

Большую практическую перспективу представляет использование аддитивной технологий для выращивания деталей и изделий из вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и других тугоплавких материалов, которые плохо обрабатываются механическими методами. Высокие показатели прочности получены при выращивании образцов из молибденовых сплавов, превышающие на 20...25 % значения, полученные вакуумной электронно-лучевой и вакуумной электродуговой плавкой [6].

Особое значение имеет изготовление имплантов в медицине из молибдена, титана и их сплавов, обладающих высокой биосовместимостью и отсутствием токсичности. В связи с этим возрастает значимость изготовления индивидуальных для каждого случая имплантов, выращиваемых по конкретной модели для каждого индивидуума.

Развитие аддитивного производства наряду с изготовлением более производительных комплексов ориентируется на дальнейшие технологические разработки для выращивания изделий из широкого круга порошков конструкционных материалов, где особое место занимают возможности формирования новых композиционных материалов в процессе выращивания.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 664 с.

2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. 278 с.

3. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций: учебник / Щербakov А.В., Гапонова Д.А., Слива А.П. и др.; под ред. А.Г. Григорьянца, В.К. Драгунова. М.: Изд. МЭИ. 2022. 676 с.

4. Kaden L., Matthaus G., Ullsperger T., Seyfarth B. Nolte Selective laser melting of cooper using ultrashort laser pulses // Applied Physics A. 2017. Vol.123. № 9. Pp. 1–6.

5. Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек на выращивании изделий из медных сплавов // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 6 (711). С. 20–28.

6. The Microstructure and Cracking Behaviors of Pure Molybdenum Fabricated by Selective Laser Metting / Yan[etal]. Materials, 2022.15 p.

7. Александрова А.А., Базалеева К.О., Григорьянц А.Г. Прямое лазерное выращивание композиционного материала инконель 625/TiC: влияние структурного состояния исходного порошка // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120. № 5. С. 498–504.

## REFERENCES

1. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing: Textbook for universities / edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2006, 664 p.

2. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I., Tretyakov R.S. Laser additive technologies in mechanical engineering: textbook for universities / edited by A.G. Grigoryants.-Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018, 278 p.

3. Additive technologies in the production of metal structures: textbook / Shcherbakov A.V., Gaponova D.A.,



Sliva A.P., et. al; edited by A.G. Grigoryants, V.K. Dragunov. Moscow: Publ. house MEI, 2022, 676 p.

4. Kaden L., Matthaus G., Ullsperger T., Seyfarth B. Nolte Selective laser melting of cooper using ultrashort laser pulses // Applied Physics A. 2017. Vol.123. № 9. pp 1–6.

5. Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. The influence of the main parameters of the selective laser melting process on the stability of forming single tracks for growing products made of copper

alloys // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. (News of high schools. Mechanical Engineering), 2019, no. 6 (711), pp. 20–28.

6. The Microstructure and Cracking Behaviors of Pure Molybdenum Fabricated by Selective Laser Metting/Yan[etal]. Materials, 2022. 15 p.

7. Alexandrova A.A., Bazaleeva K.O., Grigoryants A.G. Direct laser growth of inconel 625/TiC : effect of structural state of initial powder. // Physics of metals and metall science, 2019, vol. 120, no. 5, pp. 498–504.

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 12.10.2023; assepted for publication 20.10.2023.

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

*Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.*

Сдано в набор 17.09.2024. Выход в свет 30.09.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16