

тронно-лучевого аддитивного производства. Исследована структура и установлены механические свойства нового материала.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00084, <https://rscf.ru/project/21-79-00084/>.*

Список используемых источников:

1. Murr LE. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Addit Manuf* 2015;5:40–53. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.12.002>.

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НА СОСТОЯНИЕ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕХАНИЧЕСКИМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

М.А. Химич<sup>1,2,а</sup>, к.т.н., м.н.с., Е.А. Ибрагимов<sup>3</sup>, к.т.н., ст. преподаватель,  
В.В. Чебодаева<sup>1</sup>, к.т.н., м.н.с.

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
634055, Томская обл., г. Томск, пр. Академический, 2/4

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Томская обл., г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>3</sup>Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26  
E-mail: <sup>а</sup>khimich@ispms.ru

**Аннотация.** С целью предотвращения формирования неоднородностей химического состава в объеме 3D-образцов сплава *Co-Cr-Mo* получаемых селективным лазерным сплавлением, была предпринята попытка установления оптимального режима термообработки порошкового материала. Порошок был получен механическим легированием в аргоне в течение 30 минут. Оптимальной термообработкой является изотермический отжиг в диапазоне температур 350-425 °С.

**Ключевые слова:** *Co-Cr-Mo* сплавы, селективное лазерное сплавление, некоммерческий порошок, термообработка.

**Abstract.** In order to prevent the formation of inhomogeneities of the chemical composition in the bulk of 3D-samples of the *Co-Cr-Mo* alloy obtained by laser powder bed fusion, an attempt was made to establish the optimal mode of heat treatment of the powder material. The powder was obtained by mechanical alloying in argon during 30 minutes. The optimal heat treatment is isothermal annealing in the temperature range of 350-425 °C.

**Keywords:** *Co-Cr-Mo* alloys, laser powder bed fusion, non-commercial powder, thermal treatment.

Сплав, содержащий 66 мас. % *Co*, 28 мас. % *Cr* и 6 мас. % *Mo* (*CoCrMo*) – один из жаропрочных, коррозионно- и износостойких сплавов, предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах и при высоких температурах, также используемый и в качестве материала для производства имплантатов [1]. Порошковые композиции, применяемые в селективном лазерном сплавлении (СЛС), должны удовлетворять ряду требований: сферическая форма частиц, размер частиц, фазовый и элементный состав и т.д. В настоящее время порошки системы *Co-Cr-Mo*, отвечающие требованиям СЛС, производятся и могут быть приобретены в России в компании «Полема» (Тула) [2]. Такой порошок представлен частицами, имеющими требуемый состав, распределение по размерам в диапазоне 20-70 мкм, фазовым составом (стабилизированная высокотемпературная  $\gamma$ -фаза) со сферической или сфероподобной формой частиц. Такой комплекс характеристик обычно получают методами сфероидизации.

Метод механического легирования позволяет формировать порошковый материал, который отвечает большинству требований к порошкам для СЛС, требующий существенно меньших финансовых и энергетических затрат, в сравнении с методами сфероидизации [3]. Варьирование продолжительности механической обработки порошка приводит к изменению химического и фазового составов, структуры и свойств конечного изделия, получаемого СЛС [4]. Ранее нами сообщалось о результатах поиска оптимального режима механического легирования порошкового материала и последующей термообработки формируемых СЛС-объектов [5-7]. Формирование 3D-объектов селектив-

ным лазерным сплавлением из неkomмерческих порошков – комплексная задача, требующая различных технологических решений на каждом из этапов реализации.

Как уже сообщалось [5,6] при использовании для СЛС порошка, сформированного механическим легированием, можно «вырастить» объемные 3D-образцы сплава *Co-Cr-Mo* в многофазном состоянии и с неравномерным распределением осадений оксида хрома по объему полученного объекта. Из литературных данных известно, что устранить неоднородности химического и фазового состава можно путем подобранного режима термообработки порошкового материала и СЛС-образца [8].

В настоящей работе была предпринята попытка установить оптимальный режим термообработки порошка для СЛС, полученного механическим легированием, который бы позволил предотвратить формирование неоднородностей химического состава в получаемых 3D-объектах сплава *Co-Cr-Mo*.

В качестве исходного материала использовался порошок, полученный из элементарных кобальта, хрома и молибдена механическим легированием в защитной атмосфере аргона в течение 30 минут, как это было описано в [5,6]. Для установления режимов термообработки порошок подвергался термогравиметрическому и дифференциальному сканирующему калориметрическому анализу на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG. Порошок помещался в корундовый тигель. Нагрев осуществлялся в диапазоне температур 25-1350 °С в защитной атмосфере чистого аргона. Скорость нагрева составила 10 °С/мин. Элементный состав порошка после термообработки исследовался методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50.

На рисунке 1 представлены ТГ-ДСК кривые, полученные в результате температурных исследований механически легированного порошка. Куполообразная часть ДСК-кривой соответствует фазовому превращению  $\gamma \rightarrow \varepsilon$ . Небольшой подъем ТГ-кривой в интервале 25-100 °С соответствует поглощению порошком остаточных газов в камере. Плавный спуск в интервале 350-425 °С соответствует их высвобождению, а последующий подъем после температуры 450 °С – активное поглощение порошком остаточных газов, доля которых в камере не снижается в связи с их присутствием в самом защитном газе – аргоне. Как можно видеть, ЭДС позволяет идентифицировать небольшое количество кислорода на поверхности частиц порошка (рис. 1 б, в). Его доля не превышала 5 мас. %. Распределение кобальта, хрома и молибдена в порошке равномерно по всему объему.

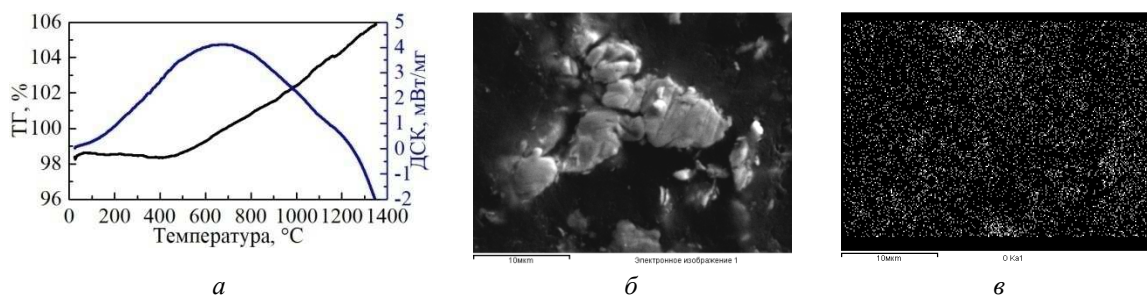


Рис. 1. ТГ-ДСК кривые (а), РЭМ-изображение шлифов поверхности частиц (б) и карта распределения кислорода (в) порошка *Co-Cr-Mo*, полученного механическим легированием в Ar в течение 30 минут

#### Заключение

Предпринята попытка установления оптимального режима термообработки порошкового материала для селективного лазерного сплавления, полученного механическим легированием в защитной атмосфере аргона в течение 30 минут. Оптимальным режимом термообработки порошка является изотермический отжиг в диапазоне температур 350-425 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0004.

Благодарности. Авторы выражают благодарность к.т.н. Н.А. Сапрыкиной, к.т.н. А.А. Сапрыкину, к.т.н. В.И. Яковлеву, к.х.н. Е.А. Вайтулович и д.ф.-м.н. профессору Ю.П. Шаркееву.

«Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН» и в Томском материаловедческом центре коллективного пользования.

Список используемых источников:

1. Wei D., Koizumi Y., Chiba A., Ueki K., Ueda K., Narushima T., Tsutsumi Y., Hanawa T. Heterogeneous microstructures and corrosion resistance of biomedical Co-Cr-Mo alloy fabricated by electron beam melting (EBM) // Additive Manuf. 2018. 24. 103–114. Doi 10.1016/j.addma.2018.09.006.
2. Полема. Акционерное общество [электронный ресурс] // 2022. <http://www.polema.net> (Дата обращения: 10.04.2022).
3. Zhuravleva K., Scudino S., Khoshkhou M.S., Gebert A., Calin M., Schultz L., Eckert J. Mechanical Alloying of  $\beta$ -Type Ti-Nb for Biomedical Applications // Adv. Eng. Mater. 2013. 15(4). 262–266. Doi 10.1002/adem.201200117.
4. Kovalevskaya Zh.G., Sharkeev Yu.P., Khimich M.A., Korchagin M.A., Bataev V.A. Ti-Nb powder alloys in the additive technologies // Nanosci. Technol. Int. J. 2017. 8(3). 203–210. Doi 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.v8.i3.30.
5. Khimich M.A., Ibragimov E.A., Chebodaeva V.V., Saprykin A.A., Saprykina N.A., Sharkeev Yu.P. Comparison the Preparation Methods of Powder Feedstock for Laser Powder Bed Fusion // Solid State Phenomena. 2022. 328. 63-71. Doi:10.4028/p-7tc3od.
6. Khimich M.A., Ibragimov E.A., Yakovlev V.I., Tolmachev A.I., Chebodaeva V.V., Uvarkin P.V., Saprykina N.A., Saprykin A.A., Sharkeev Yu.P. Structure and Phase Composition of Additive Co-Cr-Mo Alloy Affected by the Duration of Mechanical Alloying the Composite Powder // AIP Conference Proceedings. 2022. 2509, 020104. Doi: <https://doi.org/10.1063/5.0084867>.
7. Khimich M.A., Ibragimov E.A., Tolmachev A.I., Chebodaeva V.V., Uvarkin P.V., Saprykina N.A., Saprykin A.A., Sharkeev Yu.P. Influence of thermal treatment duration on structure and phase composition of additive Co-Cr-Mo alloy samples // Letters on Materials. 2022. 12(1). 43-48. Doi: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-1-43-48>.
8. Polozov I, Sufiiarov V., Popovich A., Masaylo D., Grigoriev A. Synthesis of Ti-5Al, Ti-6Al-7Nb, and Ti-22Al-25Nb alloys from elemental powders using powder-bed fusion additive manufacturing // J. Alloy. Compd. 2018. 763. 436–445. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.325>

**Порошковый материал для селективного лазерного сплавления  
медицинского сплава**

*М.А. Химич<sup>1,2,a</sup>, к.т.н., м.н.с., Е.А. Ибрагимов<sup>3</sup>, к.т.н., ст. преподаватель,  
А.А. Сапрыкин<sup>4</sup>, студент*

*<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
634055, Томская обл., г. Томск, пр. Академический, 2/4*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Томская обл., г. Томск, пр. Ленина, 36*

*<sup>3</sup>Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

*<sup>4</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
E-mail: <sup>a</sup>khimich@ispms.ru*

**Аннотация.** Описаны результаты поискового эксперимента по формированию 3D-объектов селективным лазерным сплавлением из некоммерческого порошка. Порошок для 3D-печати был получен многократным просеиванием элементных порошков *Fe*, *Ti* и *Cu*. Получен пористый 3D-образец с локальными участками повышенных концентраций *Ti* и *Cu*. Использованный порошок может быть применен для проведения дальнейших экспериментов по формированию 3D-объектов селективным лазерным сплавлением.

**Ключевые слова:** 3D-сплавы, медицинские сплавы, селективное лазерное сплавление, некоммерческий порошок.

**Abstract.** Searching experiment results connected with the formation of 3D-objects by laser powder bed fusion from non-commercial powder are described. Powder for 3D-printing was produced by multiple sieving of elemental Fe, Ti and Cu powders. Porous 3D-sample with local areas of increased Ti and Cu con-