

УДК 621.762.32

**Исследование структуры и свойств образцов системы Cu-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>,  
полученных с применением экструзионной аддитивной технологии**Г.С. Копытов

Научный руководитель: к.т.н., М.Г. Криницын  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [gsk10@tpu.ru](mailto:gsk10@tpu.ru)

**Study of the structure and properties of samples of the Cu-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>  
system obtained using extrusion additive technology**G.S. Kopytov

Scientific Supervisor: Ph.D., M.G. Krinitsyn  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: [gsk10@tpu.ru](mailto:gsk10@tpu.ru)

**Abstract.** *This work examines the structure of samples of the Cu-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> system obtained using extrusion-additive technology. FDM technology, a layer-by-layer deposition method, is becoming increasingly popular. In FDM, an object is built by depositing molten material according to a predetermined algorithm, layer by layer. But there is a problem: printing parameters such as extrusion ratio, extruder temperature, printing speed, etc. for each raw material vary greatly and depend on the metals, polymers and other components included in the raw material. The parameters are determined experimentally, therefore, for new raw materials it is necessary to establish all the necessary characteristics and production parameters products before feedstocks begin to be used in mass production. In this work, experiments were carried out to determine the physical properties of samples obtained using this technology. Also, X-ray phase analysis was carried out to determine the chemical properties.*

**Key words:** *extrusive additive technology, phase analysis, FMD printing.*

**Введение**

На сегодняшний день все большую популярность приобретают аддитивные технологии [1]. Очень распространен метод послойного наплавления – FDM-печать. Он представляет собой процесс аддитивного производства, который реализовывается благодаря экструзии материалов на основе термопластичных полимеров. В FDM объект строится путем нанесения расплавленного материала по заранее установленному алгоритму, слой за слоем. В случае необходимости получить изделия из металла или керамики используют фидстоки – гранулированный материал, смесь мелкодисперсных металлических или керамических порошков с полимерным связующим [2, 3]. Однако различные фидстоки требуют определенных параметров печати, которые определяются эмпирическим путем. Целью данной работы является исследование структуры медных образцов, полученных методом FDM печати с применением фидстоков.

**Экспериментальная часть**

При создании фидстока использовались нанопорошки меди с небольшим содержанием оксида (Cu<sub>2</sub>O), сформированного в результате естественного окисления порошка. Порошки отличаются дисперсностью, поэтому были разделены на 3 отдельные серии. Следующим этапом было спекание образцов. Образцы спекались в печи в форвакууме при температуре 950 °С. Были проведены металлографические исследования образцов на оптическом микроскопе. На рисунках 1–3 представлены структуры образцов. На этапе рентгенофазового

анализа был определен фазовый состав образцов каждой серии. Полученные результаты были обработаны методом Ритвельда. Были построены дифрактограммы. Они представлены на рисунках 4 и 5. Также, были проведены исследования с образцами, напечатанными из МАХ-фазы с содержанием меди. Было получено 3 образца, каждый был спечен при различных температурах: при 850 °С, 900 °С и 950 °С. Они были помещены в прибор для исследования прочности материалов путем пластической деформации на трехточечный изгиб.

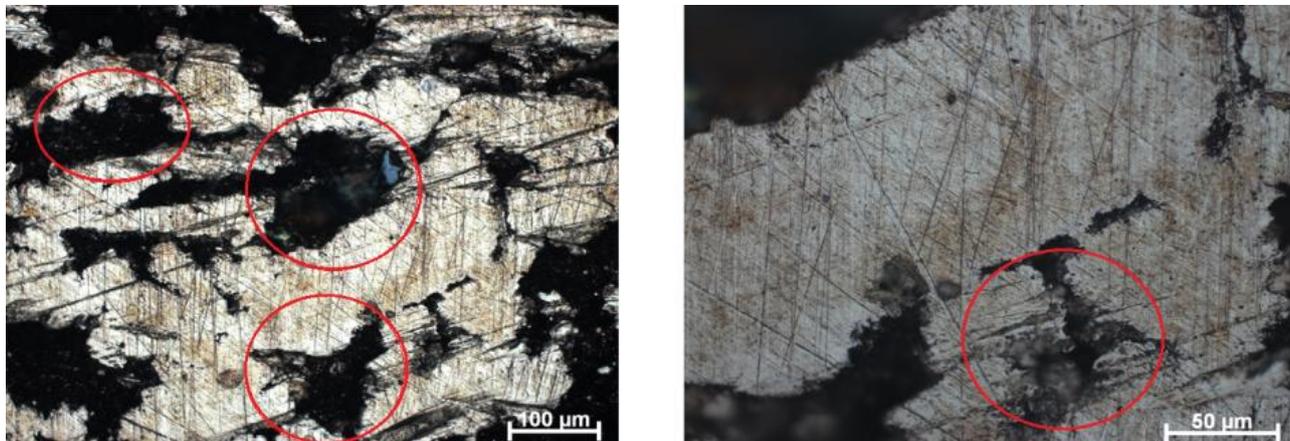


Рис. 1. Структура образцов 1 серии

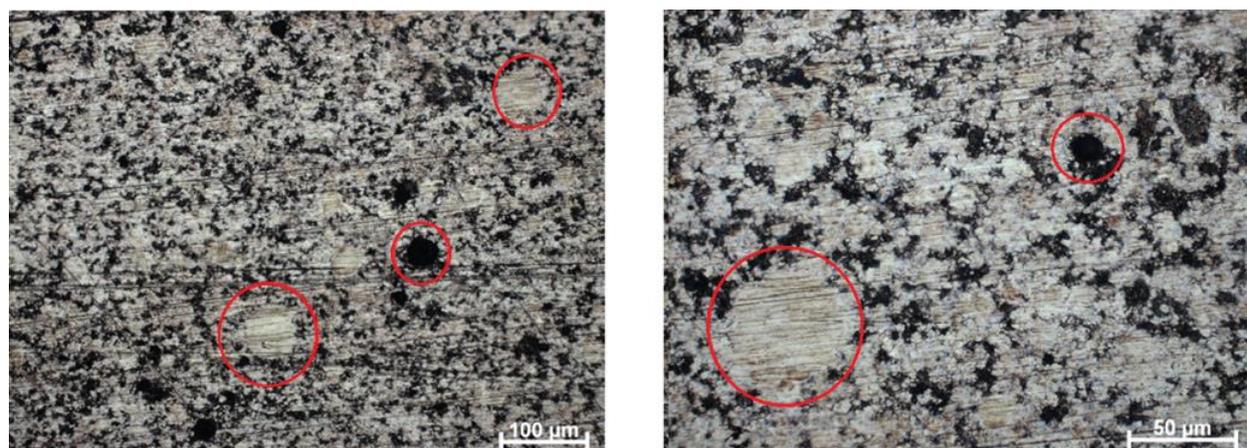


Рис. 2. Структура образцов 2 серии

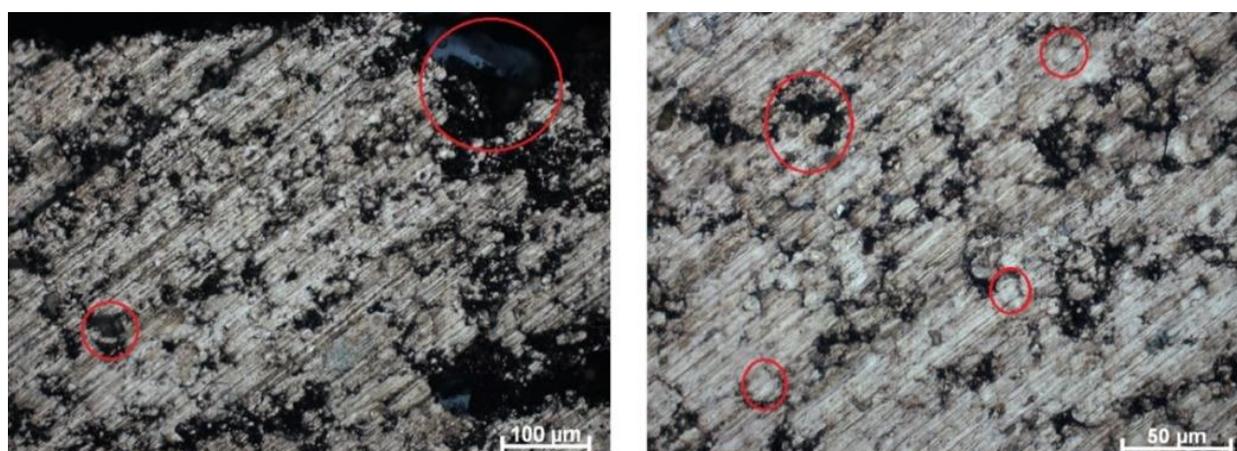


Рис. 3. Структура образцов 3 серии

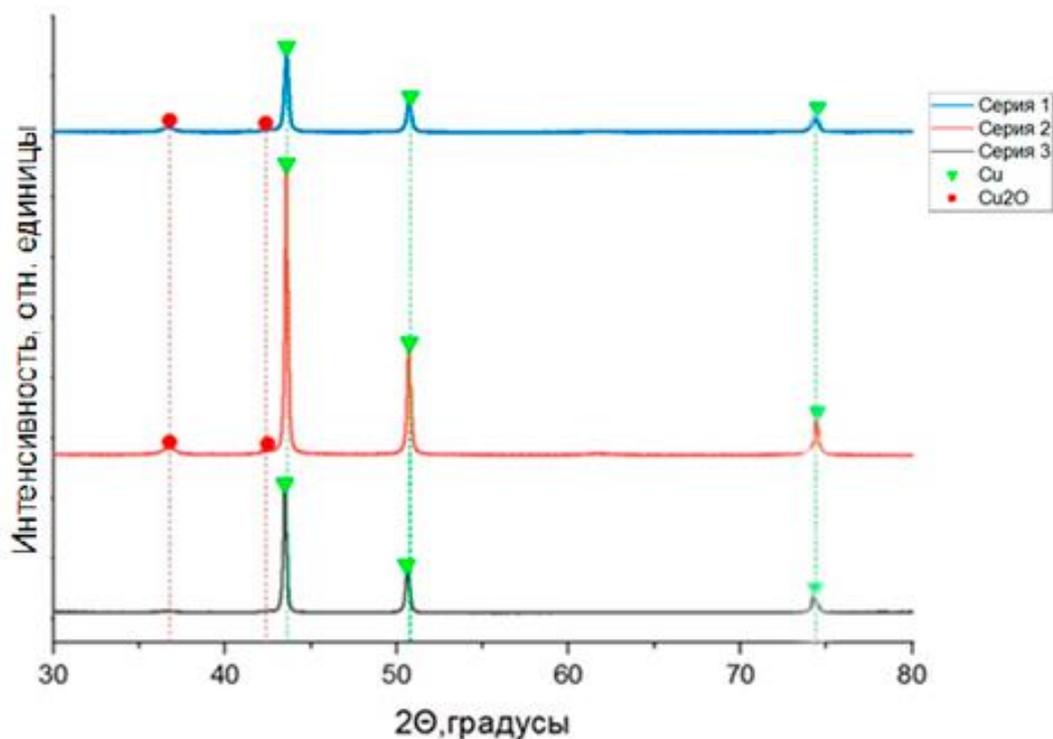


Рис. 4. Дифрактограмма образцов до спекания

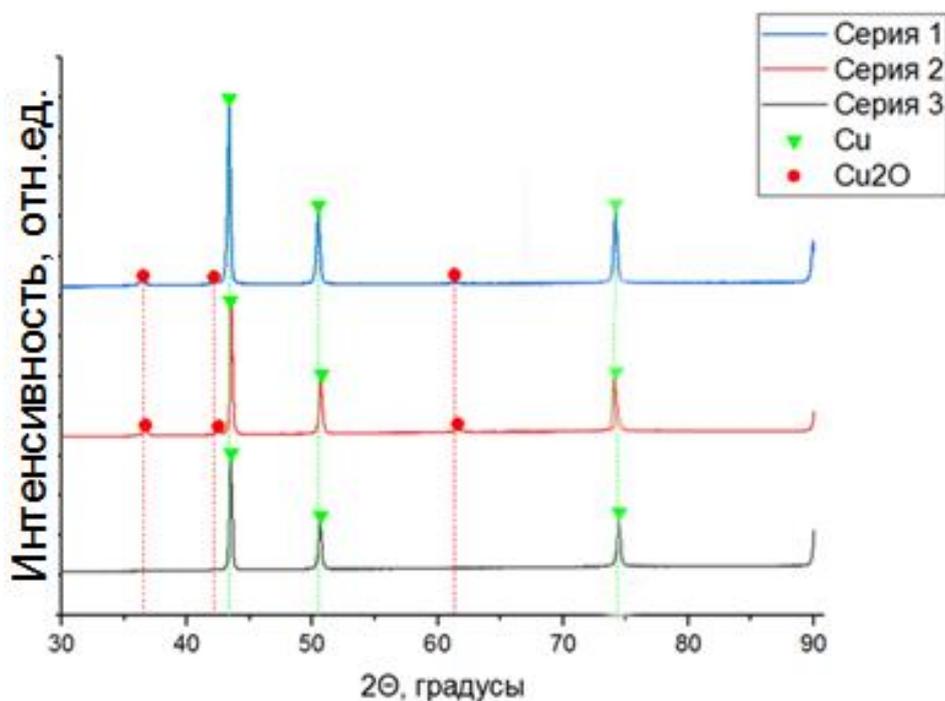


Рис. 5. Дифрактограмма образцов после спекания

По результатам исследований были построены графики зависимости нагрузки от упругой деформации, они представлены на рисунке 6. Также, по графикам был определен модуль Юнга: 1323 МПа для образца, спекенного при 850 °С, 1670 МПа для образца, спекенного при 900 °С и 2553 МПа для образца, спекенного при 950 °С.

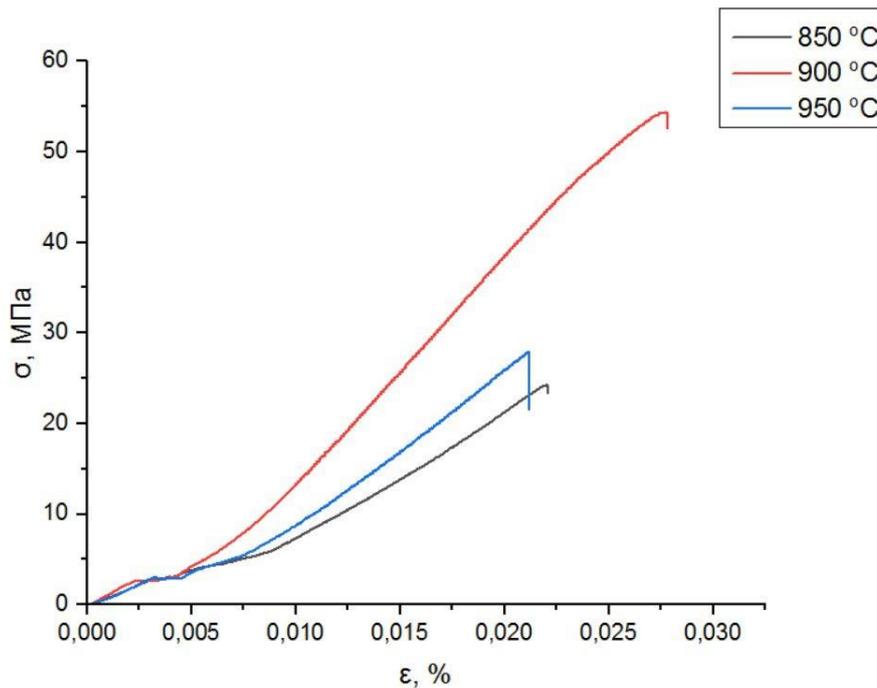


Рис. 6. Графики зависимости нагрузки от упругой деформации для трех различных образцов

### Результаты

Выявлено, что при спекании значительно увеличивается количество фаз оксида меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  в связи с реакцией с кислородом. До спекания содержание оксида меди в образцах составляет: в первой серии 9,7 %, во второй серии 2,3 %, в третьей серии 1,2 %. После спекания содержание оксида меди в образцах составляет: в первой серии 21,2 %, во второй серии 10,4 %, в третьей серии 9,1 %. По результатам исследования реологических свойств определено, что реологические свойства зависят от дисперсности следующим образом: чем крупнее фидсток, тем более вязким он становится. Установлена зависимость способности к окислению от дисперсности порошков: более мелкий порошок должен быть более активен по отношению к кислороду.

### Выводы

По результатам исследования реологических свойств определено, что реологические свойства зависят от дисперсности следующим образом: чем крупнее порошок, тем более вязким он становится. Также выявлено, что при спекании образцов значительно увеличивается количество фаз оксида меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  в связи с реакцией с кислородом. Установлена зависимость способности к окислению от дисперсности порошков: чем крупнее порошок, тем он менее активен с кислородом. Определено, что с ростом среднего размера частиц растет и твердость материала.

### Список литературы

1. Yufei Chen et. al. Integration of interlayer surface enhancement technologies into metal additive manufacturing: A review // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 165. – P. 94–122.
2. Van Pham D. et al. Study into the effects of the feedstock properties and stability on the catalytic hydrocracking of heavy oil // Fuel. – 2023. – Vol. 339. – P. 127427.
3. Liu C. et al. Effect of powders on aluminum nitride components fabricated by PIM // Powder Technology. – 2023. – Vol. 420. – P. 118409.