

УДК 669-1

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ
ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ СИСТЕМЫ CU-FE, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
ДВУХПРОВОЛОЧНОЙ ПОДАЧИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ 3D-ПЕЧАТИ
С РЕГУЛИРОВАНИЕМ СОДЕРЖАНИЯ СТАЛИ В СИСТЕМЕ**

К.С. Осипович, А.В. Чумаевский, Е.О. Княжев

Научный руководитель: д.т.н. Е.А. Колубаев

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: Osipovich_k@ispms.ru

**MECHANICAL PROPERTIES AND TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF CU-FE SYSTEM
POLYMETAL FABRICATED BY DOUBLE WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE 3D-
PRINTING**

K.S. Osipovich, A.V. Chumaevskii, E.O. Knyazhev

Scientific Supervisor: Dr. E.A. Kolubaev

¹Institute for Physics of Strength and Material Science, Russia, Tomsk, Academic str. 2/4, 634055

E-mail: Osipovich_k@ispms.ru

***Abstract.** In the present work, mechanical and tribological studies of samples of Cu-Fe system with different content of steel in the copper matrix were carried out. Heterogeneous samples containing 10, 25, 36 and 50 % of steel 321 in the C11000 matrix were obtained by double wire-feed electron beam additive technology. Changes in the deformation behavior of the samples were shown, which can be explained by the presence of copper hardening by introducing steel into the composition. Tribological tests revealed a significant decrease in the average friction coefficient, which is observed mainly in samples containing 50 % of steel. This is due to a smaller role of friction setting and plastic displacement of specimen material from the friction contact zone when steel is introduced. Changes in mechanical properties of materials with increasing steel content up to 50 % mainly consist in a significant increase in ductility.*

Введение. В настоящее время развитие аддитивных технологий позволяет получать изделия для различных отраслей техники с управлением структурой и свойствами в процессе печати [1]. Цели создания нестандартных сочетаний эксплуатационных свойств в одном изделии могут быть различными. С одной стороны, экономия дорогостоящих материалов в деталях с упрочнением только в необходимых локальных областях. С другой стороны, получение изделий с уникальными сочетаниями структуры и свойств, недостижимыми традиционными применяемыми технологиями. Наиболее развитыми методами аддитивного получения полиметаллических изделий в современной научно-исследовательской литературе являются технологии, основанные на селективном сплавлении порошков, наносимых послойно на подложку (selective laser melting, SLM) [2,3]. Технологии высокопроизводительного аддитивного электронно-лучевого проволочного производства (electron beam additive manufacturing, EBAM) для изготовления полиметаллических изделий применяются реже [4,5]. Возможность

применения ЕВАМ технологии для формирования изделий с различным сочетанием структуры и свойств приводит к необходимости проектирования и применения на практике деталей, созданных из разнородных материалов. В качестве примера изделий из разнородных материалов относится сочетание меди и аустенитной нержавеющей стали [6]. Данное сочетание позволяет объединять в детали высокую теплопроводность и электропроводность одних объемов с высокой коррозионной стойкостью и прочностью других участков.

Экспериментальная часть. Образцы были получены на экспериментальной установке для аддитивного электронно-лучевого производства металлических изделий. Для 3D-печати образцов использовали проволоку из нержавеющей стали 06X19H9T и проволоку технической чистой меди марки М1. Электронным лучом формировалась ванна расплава. В нее подавали проволоку и осуществляли 3D-печать образца в виде вертикальной стенки методом послойного нанесения материала. Для исследований закономерностей пластической деформации и трибологического поведения полиметаллов системы Cu-Fe, полученных с различным соотношением компонентов системы были изготовлены полиметаллические изделия в виде вертикальных стенок на основе меди с введением при печати 10, 25, 36 и 50 % стали 06X19H9T. На растяжение образцы в форме двойной лопатки с размерами $2,5 \times 2,5 \times 12$ мм. Механические испытания на растяжение проводили при скорости 1 мм/мин на универсальной испытательной машине УТС 110М. На трение образцы форме параллелепипеда имели следующие размеры $3 \times 3 \times 10$ мм. Испытания на трение производили на лабораторном трибометре по схеме «диск-палец» при скорости вращения контртела 250 об/мин, радиусе дорожки трения 10 мм, нагрузке на образец 15 Н, контртелом выступал диск из стали марки.

Результаты. Диаграммы испытаний на растяжение образцов полиметаллов Cu-Fe приведены на рисунке 1а. Для образцов с содержанием стали 10 % характерны наименьшие значения предела прочности (220 МПа) и предела текучести (68 МПа). При этом их механические свойства выше, чем у образцов чистой меди, полученных аналогичным способом. При увеличении содержания стали (25, 36, 50 %) предел текучести находится на одном уровне и составляет в среднем 145-155 МПа, а предел прочности – 370-380 МПа. При этом наблюдаются различия в значениях относительного удлинения при разрыве: для образцов с содержанием стали 50 % достигнуты максимальные значения, которые составляют порядка 13-15 %. Такие изменения деформационного поведения образцов можно объяснить наличием предела в упрочнении меди путем введения в состав стали. Аналогичные закономерности можно выявить при анализе результатов трибологических испытаний данных материалов (рисунок 2б). Существенное снижение среднего коэффициента трения наблюдается в основном у образцов с содержанием 50 % стали. Типичным для контакта сталь-сталь является высокая величина разброса значений коэффициента трения при испытании. Обусловлено это тем, что трение происходит с минимальным окислением и высокой ролью адгезионной составляющей. Величина износа для образцов с содержанием стали 10-36 % существенно ниже, чем при трении чистой меди. В образцах с содержанием стали 50 % – повышается в сравнении с образцами композитов с меньшим содержанием, и находится на уровне величины износа чистой меди. Это происходит за счет более высокой роли схватывания при трении и пластического оттеснения материала образца из зоны фрикционного контакта.

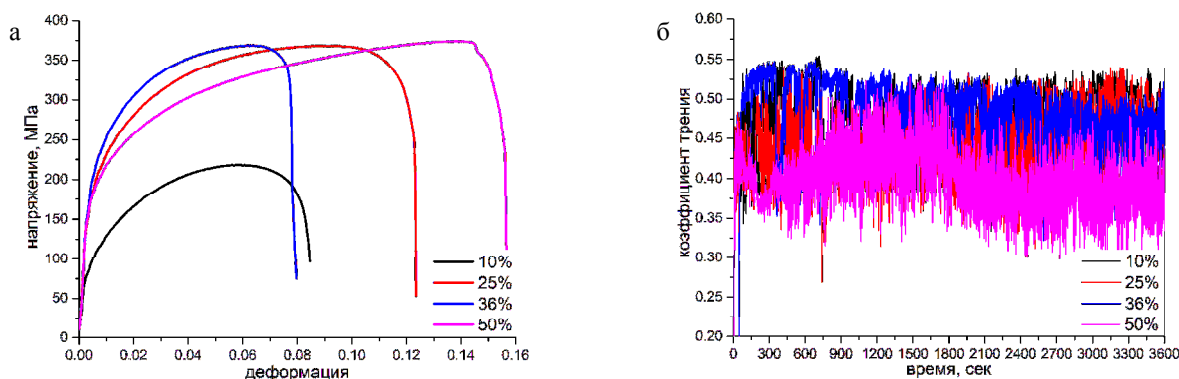


Рис. 1. Результаты механических (а) и трибологических (б) испытаний образцов системы Cu-Fe с различным содержанием стали в медной матрице

Заключение. Таким образом, с точки зрения повышения пластичности материала введение более 25 % стали в медь при электронно-лучевой печати может быть оправдано, но для повышения прочности или износостойкости является нецелесообразным. Введение 50 % стали может быть по меньшей мере избыточным, по большей – негативным для свойств материала. До введения 25 % стали происходит увеличение прочностных показателей, после которого при дальнейшем увеличении концентрации стали в композите не происходит повышения прочности материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90173.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A. and Zhang W. Additive manufacturing of metallic components // Process, structure and properties Prog. Mater. Sci. – 2018. – V.92. – P. 112–224.
- 2 Ding H., Xiao Y., Bian Z., Wu Y., Yang H., Wang H. and Wang H. Design, microstructure and thermal stability of a novel heat-resistant Al-Fe-Ni alloy manufactured by selective laser melting // J. Alloys Compd. – 2021. – V. 885. – P. 160949.
- 3 Chen J., Yang Y., Song C., Wang D., Wu S. and Zhang M. Influence mechanism of process parameters on the interfacial characterization of selective laser melting 316L/CuSn10 // Mater. Sci. Eng. A. – 2020. – V. 792. – P. 139316.
- 4 Xu J., Peng Y., Zhou Q., Fan J., Kong J., Wang K., Guo S. and Zhu J. Microstructure and mechanical properties of Ti-52 at% Al alloy synthesized in-situ via dual-wires electron beam freeform fabrication // Mater. Sci. Eng. A. – 2020. – V. 798. – P. 140232.
- 5 Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Kalashnikov K.N. and Kalashnikova T.A. regularities of structural changes after friction stir processing in materials obtained by the additive method // Nanosci. Technol. An Int. J. – 2020. – V. 11. – P. 195–205.
- 6 Shu X., Chen G., Liu J., Zhang B. and Feng J. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication // Mater. Lett. – 2018. – V. 213. – P. 374–7.