

УДК 621.762

В.В. Чебодаева, Н.А. Лугинин, А.Е. Резванова, Л.Ю. Иванова,  
А.В. Первиков, Н.В. Сваровская  
Институт физики прочности СО РАН, Томск, Россия

## СОЗДАНИЕ БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОРОШКА Fe-Cu

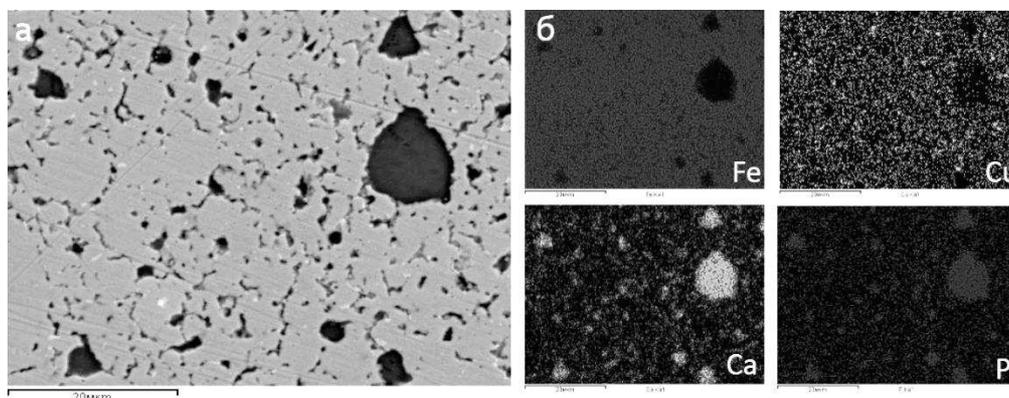
Создание новых биокomпозитных материалов для восстановления поврежденных костных тканей является одной из важнейших задач медицинского материаловедения [1]. В последние годы актуальным является использование полимерных биоматериалов в силу их контролируемой скорости растворения в организме. Однако данные материалы не обладают достаточной механической прочностью для восстановления костной ткани, находящейся под нагрузкой. Для решения этой проблемы перспективно использовать биodeградируемые материалы на основе металлов. Часто для создания биodeградируемых имплантатов применяют железо, в силу того, что данный металл участвует во многих метаболических процессах, таких как перенос кислорода, энергетический обмен, работа ферментов и синтез ДНК [1]. Для увеличения скорости коррозии железных материалов вводят легирующие элементы, например, медь, способствующая образованию гальванической пары Fe-Cu. Кроме того, медь обладает высокими антибактериальными свойствами, что обеспечит минимизацию инфицирования имплантируемого материала [1]. Для придания биоактивных свойств материалу перспективно вводить в его состав гидроксиапатит ( $\text{HA}$ ,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) [2], близкий по составу с минеральной составляющей человеческой костной ткани. Таким образом, целью данной работы было создание биodeградируемого и биосовместимого материала на основе порошков Fe-Cu и гидроксиапатита (ГА).

В качестве исходного порошка для создания композитов использовали нанопорошок номинального состава: Fe – 90 мас. %, Cu – 10 мас. % (Fe90-Cu10), полученный методом электровзрыва проволоки (ЭВП) диаметром  $d=0.35$  и  $d=0.10$  мм марок СТ1 и М1 соответственно при одинаковой длине 120 мм [3,4]. Получение нанопорошка производилось в атмосфере аргона. Для создания фидстока к металлической части композита был добавлен порошок стехиометрического гидроксиапатита  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$  (ИХТТМ СО РАН, Новосибирск, Россия) [5] в количестве 5 мас. %. Для печати методом 3-d принтинга была изготовлена полимерная составляющая следующего номинального состава: 75 мас. % – канифоль, 15 мас. % – 1.6 гександиол, 10 мас. % – этиленвинилацетат.

Металлокерамическая и полимерные части были смешаны в следующих соотношениях: 50 к 50 (50Fe-Cu-ГА). Печать производилась на 3-d принтере Prusa i3 (Prusa Research, Прага, Чехия), с доработанной системой подачи проволоки для печати порошками с полимерной составляющей. Для удаления полимерной составляющей заготовки изделие было подвергнуто растворному дебиндингу в ацетоне в течение 24 часов. Спекание производилось в вакуумной печи Nabertherm. Пробоподготовка образца производилась шлифовкой на абразиве SiO<sub>2</sub> с постепенным уменьшением зернистости от M180 до M1000 (ГОСТ 6456-82). Полировка образца производилась алмазной суспензией абразивом 1/0 (ГОСТ 25593-83).

Исследования структуры и элементного анализа материалов проводились методом растровой электронной микроскопии (Argeo S LoVac (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, США) и LEO EVO 50 (Zeiss, Йена, Германия) с приставками для энергодисперсионного анализа.

На рисунке 1 представлено РЭМ-изображение образца и карты распределения элементов (Fe, Cu, Ca и P). Видно, что железо и медь распределены равномерно, но при этом медь концентрируется в небольших частицах, не превышающих 1 мкм. По изображению и картам распределения кальция и фосфора можно видеть, что в образце присутствуют мелкие поры со средним размером 1,5 мкм и более крупные немногочисленные частицы ГА размером 6,8 мкм.



**Рисунок 1 - РЭМ-изображение поверхности (а) образца и карты распределения элементов (б): Железо (Fe), медь (Cu), кальций (Ca), фосфор (P).**

В таблице 1 представлен элементный состав образца на основе порошка Fe-Cu-ГА. Видно, что состав близок к составу исходных порошков, добавляемых в фидсток.

**Таблица 1 – Элементный состав образца Fe-Cu-ГА**

Содержание элементов, мас.%			
Fe	Cu	Ca	P
87,9	6,5	3,3	2,3

В результате выполненной работы был создан образец методом 3-d печати из исходных порошков Fe-Cu-ГА. Было установлено, что состав полученного образца близок к составу исходных компонентов для изготовления фидстока. Элементы основного порошка железо и медь распределены однородно, при этом порошок ГА сконцентрирован в частицах со средним размером 6,8 мкм. В дальнейшем планируется варьирование соотношения полимерной части и порошка Fe-Cu-ГА для улучшения механических и функциональных свойств.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-73-00207, <https://rscf.ru/project/22-73-00207>.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lin, W. In vivo degradation and endothelialization of an iron bioresorbable scaffold / W. Lin, H. Zhang, W. Zhang, H. Qi et al. // *Bioactive Materials* – 2021. – Vol. 6, № 4. – P. 1028–1039.
2. Gu, X. Microstructure, mechanical property, bio-corrosion and cytotoxicity evaluations of Mg/HA composites / X. Gu, W. Zhou, Y. Zheng, L. Dong, Y. Xi, D. Chai. // *Materials Science and Engineering: C* – 2010. – Vol. 30, № 6. – P. 827–832.
3. Pervikov, A. Energy characteristics of the electrical explosion of two intertwined wires made of dissimilar metals / A. Pervikov, E. Glazkova, M. Lerner // *Physics of Plasmas*. – 2018. – Vol. 25, № 7. – P. 070701.
4. Lerner, M.I. Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements / M.I. Lerner, A.V. Pervikov, E.A. Glazkova, N.V. Svarovskaya, A.S. Lozhkomoev, S.G. Psakhie // *Powder Technology*. – 2016. – Vol. 288. – P. 371–378.
5. Chaikina, M.V. Interaction of calcium phosphates with calcium oxide or calcium hydroxide during the “soft” mechanochemical synthesis of hydroxyapatite / M.V. Chaikina, N.V. Bulina, O.B. Vinokurova, I.Y. Prosanov, D.V. Dudina // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45, № 14. – P. 16927–16933.