ХХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

УДК 669.15-192:61

БИОАКТИВНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

<u>H.A. Лугинин^{1,2},</u> В.В. Чебодаева¹, А.Е. Резванова¹ ¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055 ²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050 E-mail: nikishek90@gmail.com

BIOACTIVE COMPOSITES FOR BONE TISSUE REPAIR BASED ON IRON

N.A. Luginin^{1,2}, V.V. Chebodaeva¹, A.E. Rezvanova¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskii ave., 2/4, 634055 ²Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050, E-mail: nikishek90@gmail.com

Abstract. In the present study, we performed studies of the microstructure and phase composition of metalceramic composites from Fe 90 wt. % - Cu 10 wt. % powder and hydroxyapatite (Fe-Cu-HA). The composite material was obtained using additive manufacturing based on the 3D printing method with different content of powder (40, 45 and 50 %) and polymer parts (60, 55 and 50 %). It is shown that varying the proportion of Fe-Cu-HA powder does not significantly affect the elemental and phase compositions of the material. X-ray phase analysis showed the presence of three phases in the material: alpha iron, copper and hydroxyapatite. It is shown in the experiment that an increase in the polymer component of the composite leads to an increase in the defectiveness of the structure, as well as an increase in microstresses.

Введение. Биодеградируемые материалы способны обеспечить достаточную временную поддержку для костной ткани, не требуя повторного хирургического вмешательства в организм. В качестве растворимого материала целесообразным является использование металлов, так как они обладают более высокими механическими характеристиками по сравнению с полимерными аналогами [1]. Многие исследователи разрабатывают и изучают свойства биоматериалов на основе железа в силу того, что данный металл участвует во многих метаболических процессах, таких как перенос кислорода, энергетический обмен, работа ферментов и синтез ДНК [2]. Несмотря на его огромный потенциал для использования в биоразлагаемых ортопедических имплантатах, его применение ограничивает низкая скорость коррозии в физиологических средах [3]. Введение в сплавы на основе железа медь позволит повысить скорость резорбции благодаря образованию гальванической пары Fe-Cu и обеспечить антибактериальность имплантируемому материалу [4]. Для того обеспечения биоактивности материала перспективно вводить частицы гидроксиапатита (HA, Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂) [5], обладающих превосходной биосовместимостью и близкому составу с минеральной фазой человеческой кости [6].

Целью данной работы было создание пористого биорезорбируемого композитного материала на основе порошков железа, меди и гидроксиапатита, обладающего антибактериальными и биоактивными

ХХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

свойствами, методом «3-d принтинга» с добавлением пластифицирующих связок в виде полимеров.

Экспериментальная часть. В качестве исходного порошка для создания композитов использовали нанопорошок номинального состава: Fe – 90 мас. %, Cu – 10 мас. % (Fe-Cu), полученный методом электровзрыва проволоки (ЭВП) диаметром 0,35 и 0,10 мм марок CT1 и M1 длиной 120 мм [7]. Нанопорошок производится в атмосфере аргона. К металлической части композита был добавлен порошок стехиометрического гидроксиапатита Ca₁₀(PO₄)₂(OH)₆ (ГАП, ИХТТМ СО РАН, Новосибирск, Россия) 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-HA), 45 к 55 (45Fe-Cu-HA), 40 к 60 мас. % (40Fe-Cu-HA) соответственно.

Результаты. Оптические изображения микроструктуры композитов представлены на рисунке 1.



Структура образцов после спекания представляет собой зерна фазы «альфа-железо» (светлые участки) средним размером $d = 10 \pm 5$ мкм с мелкими включениями медной фазы (рыжие участки) средним размером $d = 1 \pm 0.5$ мкм, при чем некоторые зерна отделены друг от друга широкими границами зерен (темные вытянутые области). Кроме того, их доля повышается с ростом полимерной составляющей до спекания. В структуре композита присутствуют частицы гидроксиапатита (ГАП), средним размером 20 ± 10 мкм (темные области неправильной формы).

На рисунке 2 представлены рентгенограммы композитов на основе Fe-Cu- ГАП после спекания. В результате рентгенофазового анализа были обнаружены интенсивные пики фазы «α-Fe». В таблице 1 представлены рассчитанные параметры решеток основной фазы железа, а также величины областей когерентного рассеяния (OKP) и напряжений второго рода соответствующей фазы.



Рис. 2. Расчетные рентгенограммы образцов композита с варьирующийся полимерной частью

Объем элементарной ячейки и параметр решетки основной фазы во всех композитах соответствуют справочным данным в пределах ошибки измерения. Однако уменьшение доли порошка Fe-Cu-ГАП и увеличение доли полимерной составляющей в композите после спекания ведет к

ХХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

увеличению величины напряжений второго рода, а также к уменьшению ОКР. Композиты характеризуются одинаковым значением открытой пористости (≈ 15 %), при этом величина ОКР и микронапряжений второго рода указывают на увеличение дефектности структуры, из чего следует вывод об увеличении количества или среднего размера закрытых пор с изменением доли полимерной составляющей композитов до консолидации.

Таблица 1

Образец	Параметр решетки a, Å	Объем элементарной ячейки, Å ³	ОКР, нм	ε*, %
Справочные данные (COD 96-110-0109)	2.868	23.590	-	-
50Fe-Cu- ГАП	2,867±0,001	23,580±0,016	53	11,7
45Fe-Cu- ГАП	2,868±0,001	23,590±0,016	45	13,6
40Fe-Cu- ГАП	2,869±0,001	23,600±0,016	37	15,7

Расчетные параметры структуры фазы «а-Fe» по данным РСА для композитов

*Микродеформация, вызванная напряжениями второго рода

Заключение. В результате работы были получены металлокерамические биорезорбируемые композиты на основе системы железо-медь-гидроксиапатит методом 3-d принтинга, позволяющим формировать медицинские изделия сложной формы. Данные композиты обладают разным значением закрытой пористости, что, может оказывать влияние на механические и коррозионные свойства материала. Данный факт позволит изготавливать медицинские имплантаты для различных приложений, варьируя полимерную составляющую на этапе формирования изделия.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kang M.-H. et al. An asymmetric surface coating strategy for improved corrosion resistance and vascular compatibility of magnesium alloy stents // Mater Des. 2020. Vol. 196. P. 109182.
- Lin W. et al. In vivo degradation and endothelialization of an iron bioresorbable scaffold // Bioact Mater. 2021. – Vol. 6, № 4. – P. 1028-1039.
- 3. Lin W. et al. Long-term in vivo corrosion behavior, biocompatibility and bioresorption mechanism of a bioresorbable nitrided iron scaffold // Acta Biomater. 2017. Vol. 54. P. 454-468.
- 4. Gutmanas E.Y. et al. Drug loaded biodegradable load-bearing nanocomposites for damaged bone repair. // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1882. P. 020025 (1-13).
- Yamasaki H., Sakai H. Osteogenic response to porous hydroxyapatite ceramics under the skin of dogs // Biomaterials. – 1992. – Vol. 13, № 5. – P. 308-312.
- LeGeros R.Z. Calcium Phosphate-Based Osteoinductive Materials // Chem Rev. 2008. Vol. 108, № 11. P. 4742–4753.
- 7. Pervikov A., Glazkova E., Lerner M. Energy characteristics of the electrical explosion of two intertwined wires made of dissimilar metals // Phys Plasmas. 2018. Vol. 25, № 7. P. 070701.