

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах
в период с 29.07.2022 г. по 30.06.2023 г.

по проекту **«Осаждение макроциклических соединений на поверхность сплавов никелида титана для высвобождения инкапсулированных лекарств и ускоренной индукции биологических тканей»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-72-10037

Руководитель: Байгонакова Гульшарат Аманболдыновна, канд. физ.-мат. наук

Все исследования показывают, что для достижения хороших биомедицинских характеристик имплантатов из NiTi сплава необходимо одновременно учитывать пористость, структуру, фазовый состав и результирующие механические свойства. В зависимости от типа реактора и добавки инертного порошка TiNi (5-10 %) были получены пористые сплавы с пористостью от 55 % до 68 % методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Наблюдалось увеличение размеров пор и уменьшение размеров перемычек с ростом пористости. Образец с пористостью $P = 55\%$ имеет средний размер стенок пор 215 мкм, средний размер пор 187 мкм и коэффициент проницаемости $(0,044 \pm 0,002) \times 10^{-9} \text{ м}^2$, а образец с максимальной пористостью $P = 68\%$ имеет средний размер стенок пор 140 мкм, средний размер пор 229 мкм и коэффициент проницаемости $(0,243 \pm 0,002) \times 10^{-9} \text{ м}^2$, соответственно. Пористость оказывает значительное влияние на коэффициент проницаемости. В целом, рост пористости приводит к увеличению коэффициента проницаемости, поскольку увеличивается количество взаимосвязанных пустот. Однако, для исследуемых образцов коэффициент проницаемости для образца с пористостью $P = 55\%$, $P = 59\%$ и $P = 65\%$ незначительно отличаются и составляет $(0,044 \pm 0,002) \times 10^{-9} \text{ м}^2$. Форма, размер, тип и связность пор могут быть факторами, влияющими на проницаемость. В данном случае, электронно-микроскопические изображения показали, что первые три образца имеют большое количество закрытых пор. Все сплавы находятся в смешанном структурном состоянии состоит из фазы TiNi в двух кристаллографических модификациях: B2-аустенита и B19'-мартенсита и интерметаллической фазы Ti₂Ni. При синтезе во всех случаях образуются двухфазные дендритные области перитектической кристаллизации, состоящие из светло-серых участков TiNi и межзеренной сетки темно-серой фазы Ti₂Ni. Наблюдается разница в объемной доле межзеренной сетки темно-серой фазы Ti₂Ni и участков TiNi в пористых сплавах. Изменения в зонах перитектической кристаллизации связаны с различным распределением температуры и количеством тепла реакции в реакторах с закрытым и открытым потоком.

В результате исследования смачиваемости пористых образцов обнаружено, что все образцы показывают практически гидрофильное поведение при смачивании поверхностей водой. Адгезия и пролиферация клеток лучше проявляются на поверхности с умеренной гидрофильностью, имеющей краевой угол смачивания водой $\theta < 60^\circ$. Максимальные значения контактного угла характерны для образца № 4

с пористостью 68 % и составляет $54,7 \pm 3,56^\circ$, полученного в открытом реакторе, а минимальные значения контактного угла характерны для образца № 1 с пористостью 55 %, полученного в закрытом реакторе, и составляет $42,9 \pm 3,19^\circ$. Испытания при сжатии сплавов TiNi с разной пористостью показали, что по мере увеличения пористости механические характеристики материала снижаются. При увеличении пористости с 59 % до 68 % предел прочности уменьшился с 199 МПа до 129 МПа, а предел текучести – с 104,45 МПа до 47,77 МПа. Кроме того, увеличение пористости образцов TiNi до 68 % привело к уменьшению модуля упругости на 0,73 ГПа. При увеличении пористости упругие и механические характеристики сплавов уменьшаются за счет уменьшения прочности межпоровых перемычек, а также возникающих вокруг пор концентраций напряжений, которые определяются их размером, формой, ориентацией. Как показали структурные исследования порового пространства, при увеличении пористости стенки каркаса уменьшаются в размере и увеличивается разброс размеров пор до 1201 мкм, что уменьшает прочность стенок каркаса. Образец с пористостью $\Pi = 55$ % показал самые низкие механические характеристики из-за наличия в структуре большого количества хрупкой фазы Ti₂Ni.

Клетки линии 3Т3 в течение 24 часов инкубировали на никелид титановых образцах и оценивали цитотоксичность с помощью МТТ-теста в статической культуре. Все образцы имеют низкий уровень цитотоксичности менее 50 %. Наиболее низкий уровень цитотоксичности по отношению к клеткам 3Т3 был обнаружен при культивировании в течении 24 часов образцов № 4, где он составил $(19,3 \pm 3,5)$ %. Индекс цитотоксичности образцов № 1 составил $(25,3 \pm 2,9)$ %, образцов № 2 – $(28,3 \pm 7,6)$ %, образцов № 3 – $(21,5 \pm 3,1)$ %. В проведенных исследованиях было отмечено, что образцы пористых сплавов никелида титана №1 ($\Pi = 55$ %), № 2 ($\Pi = 59$ %), № 3 ($\Pi = 65$ %), № 4 ($\Pi = 68$ %) показали величину гемолиза эритроцитов соответственно $(1,4 \% \pm 0,2)$, $(0,7 \% \pm 0,15)$, $(0,9 \% \pm 0,15)$, $(1,2 \% \pm 0,15)$ что не вызывает степени гемолиза более 2 % и согласуется со стандартами, выработанными в стандартах ГОСТ и ISO для биосовместимых материалов, контактирующими с кровеносной системой. Конфокальная микроскопия образца № 4 с осажденными клетками коррелирует с результатами цитотоксичности и показала, что пористые образцы благоприятны для адгезии и пролиферации клеток.

Представленные режимы высокотемпературного синтеза позволяют получать образцы разной пористости с оптимальным фазовым составом, структурой, механическими и биосовместимыми свойствами. Все пористые образцы обладают низкой цитотоксичностью. Установлено, что образцы пористостью в интервале от 60 % до 65 % позволяют выдерживать большую деформацию до разрушения при сжатии, имеют механические свойства, близкие к губчатой костной ткани, гидрофильную поверхность, низкий индекс цитотоксичности и гемолиза для адгезии клеточных культур.