

Влияние поровой структуры на упругие характеристики сплавов NiTi, полученных методом СВС*

Е.С. Марченко¹, А.С. Гарин¹, В.А. Скрипняк¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Рассмотрено влияние поровой структуры на механические характеристики сплавов NiTi, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при температурах предварительного нагрева реагирующей смеси Ni и Ti в диапазоне от 668 до 788 К. Исследована зависимость модуля Юнга от пористости полученных сплавов NiTi. Показано, что вариация начальной температуры реагирующей порошковой смеси приводит к изменению структурно-фазового состава и характеристик поровой структуры NiTi после СВС. Полученные в указанных условиях сплавы NiTi обладают пониженными модулями упругости и поровыми системами с объемной пористостью от 58 до 63%.

Ключевые слова: *нитинол, поровая структура, модуль Юнга, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, начальная температура реагирующей смеси.*

Введение

Пористые сплавы на основе NiTi относятся к уникальному классу интеллектуальных материалов, физико-механические свойства которых могут изменяться в широких диапазонах в зависимости от фазового состава и поровой структуры. Пористые сплавы NiTi широко используются для изготовления элементов конструкций аэрокосмической и военной техники, а также медицинского оборудования, включая имплантаты и др. В настоящее время для получения пористого NiTi развиваются технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), микроволнового спекания, аддитивные технологии селективного лазерного плавления и 3D-печати [1–4].

Интерес к пористым материалам на основе NiTi с трехмерной анизотропной взаимосвязанной структурой открытых пор, производимых с использованием технологии СВС, обусловлен возможностью формирования комплекса механических свойств за счет управления технологическими параметрами синтеза. Поскольку реакция СВС в порошковой смеси Ni и Ti протекает при малом изменении энтальпии, для инициирования начала синтеза необходим предварительный нагрев смеси до определенной температуры, зависящей от размеров частиц порошковой смеси, пористости, наличия примесей и др. Авторы работ [5, 6] показали, что варьирование температуры предварительного нагрева порошковой смеси Ni и Ti до начала СВС позволяет получать развитую поровую структуру и многофазную структуру NiTi с дисперсными частицами Ti_2Ni , Ni_4Ti_3 , Ni_3Ti_2 и Ni_3Ti .

Пористые материалы NiTi, полученные методом СВС, демонстрируют способность псевдоупругого деформирования и обладают пониженными значениями начальных модулей упругости (модуля Юнга, модуля сдвига, модуля объемного сжатия) относительно значений модулей литых сплавов NiTi с аналогичными фазовыми составами.

Обобщающие и модельные соотношения, предложенные для описания зависимостей модулей упругости сплавов от пористости и параметров поровых структур, требуют модификации в случае материалов NiTi, полученных методом СВС. Потребность в модификации обусловлена тем, что при протекании СВС-синтеза в системе Ni–Ti одновременно с пористостью и параметрами поровых структур изменяются фазовый состав и механические свойства конденсированной части материала [7, 8].

Авторы работ [8, 9] установили, что в случае СВС при получении пористого NiTi концентрации образующихся интерметаллидных частиц Ti_2Ni , Ni_4Ti_3 , Ni_3Ti_2 и Ni_3Ti изменяются в зависимости от температуры предварительного нагрева реагирующей порошковой смеси и ее структурных характеристик. Смена концентрации и пространственного распределения частиц интерметаллидных фаз приводит к изменению условий протекания фазовых превращений $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ при деформации конденсированной части пористого материала и изменению механической реакции материала на нагружение при постоянной температуре [10, 11].

* Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).