

## Structure of high-temperature shape memory alloys

The shape memory effect (SME) — the ability of a material to return to its original shape under external influence (e. g., heating) — has been known since the first half of the 20<sup>th</sup> century. At present, SME alloys are widely used in the aerospace and automotive industries, medicine, etc. The most widespread alloy is nitinol (NiTi with a nickel content of 50–51 at.%), which has high strength, corrosion resistance, shape recovery coefficient, good biocompatibility. The temperatures of the reversible thermoelastic martensitic transformation, which is the physical cause of SME, in nitinol are below 100°C. For a number of applications, it is important to de-

velop high-temperature SME alloys that operate at temperatures up to 400°C; and among the most promising candidates are NiTi(Hf,Zr) alloys.

The functional properties of SME alloys are structure-sensitive, therefore it is necessary to study the crystal structure of these alloys, including during the course of martensitic transformation (Fig. 1). At FLNP JINR, such studies are performed using the HRFD diffractometer, which can operate both in the high-resolution mode for precision study of the structural features of the material, and in the high-intensity mode for *in situ* studies of transformation processes.

Fig. 1. a) SME alloy (adapted from Ma J., et al. Int. Mater. Rev. 55 (2010)). b) Scheme of the one-way SME.

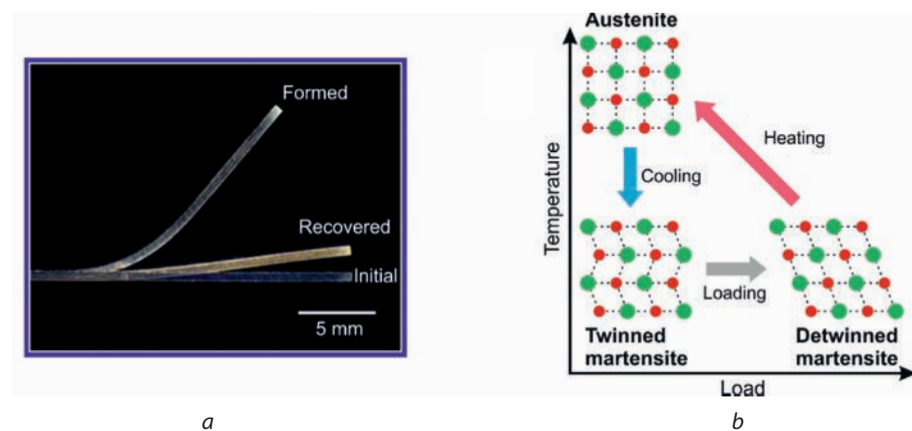


Рис. 1. а) Сплав с эффектом ПФ (адаптировано из Ma J., et al. Int. Mater. Rev. 55 (2010)). б) Схема одностороннего эффекта ПФ.

## Структура высокотемпературных сплавов с эффектом памяти формы

Эффект памяти формы (ПФ) — способность материала возвращаться в первоначальную форму при внешнем воздействии (например, нагреве) — в сплавах известен с первой половины XX века. В настоящее время сплавы с эффектом ПФ широко используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности, медицине, и др. Наиболее распространённым сплавом является нитинол (NiTi с содержанием никеля 50–51 ат.%), который обладает высокой прочностью, коррозионной стойкостью, коэффициентом восстановления формы, хорошей биосовместимостью. Температуры обратимого термоупругого

мартенситного превращения, лежащего в основе восстановления формы сплава, в нитиноле лежат ниже 100°C. Для ряда задач актуальна разработка высокотемпературных сплавов с ПФ, функционирующих при температурах до 400°C; и одними из наиболее перспективных являются сплавы NiTi(Hf,Zr).

Поскольку функциональные свойства сплавов с ПФ являются структурно-чувствительными, необходимы исследования кристаллической структуры этих сплавов, в том числе в процессе мартенситного превращения (Рис. 1). В ЛНФ ОИЯИ такие исследования проводятся на дифракто-

метре ФДВР, который может функционировать как в режиме высокого разрешения для прецизионного изучения структурных особенностей материала, так и в режиме высокой светосилы для *in situ* исследований переходных процессов. Нейтронографические исследования сплава  $Ti_{29,7}Ni_{50,3}Hf_{20}$  позволили установить структурные параметры низкотемпературного B19' мартенсита и высокотемпературного B2 аустенита и температуры прямого и обратного мартенситного превращения [1] (Рис. 2). Тензор линейного теплового расширения мартенсита содержит отрицательный коэффициент [2]. Объёмный эффект прямого B2 → B19' превращения в этом сплаве составляет 0.75%, более чем в 6 раз выше, чем в  $Ti_{50,1}Ni_{49,9}$ . Было обнаружено, что ≈13.0 об.% аустенита не участвуют в мартенситном превра-

жении. Значительное расхождение экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных величин восстанавливаемых деформаций может быть связано с присутствием остаточного аустенита и большим объёмным эффектом превращения [1].

Аналогичные исследования были проведены для четверного сплава  $Ti_{29,7}Ni_{50,3}Hf_{10}Zr_{10}$ . В нём одновременно с протеканием обратного мартенситного превращения был обнаружен эффект перехода аустенита из частично упорядоченного состояния в полностью упорядоченную B2 фазу [3]. Поскольку длина рассеяния тепловых нейтронов титаном отрицательна, дифракция нейтронов оказывается предпочтительным методом исследования эффектов упорядочения в подобных сплавах.

Fig. 2. a) Evolution of neutron diffraction patterns of  $Ti_{29,7}Ni_{50,3}Hf_{20}$  alloy with temperature. b) Temperature dependences of unit cell volumes of B19' martensite and B2 austenite.

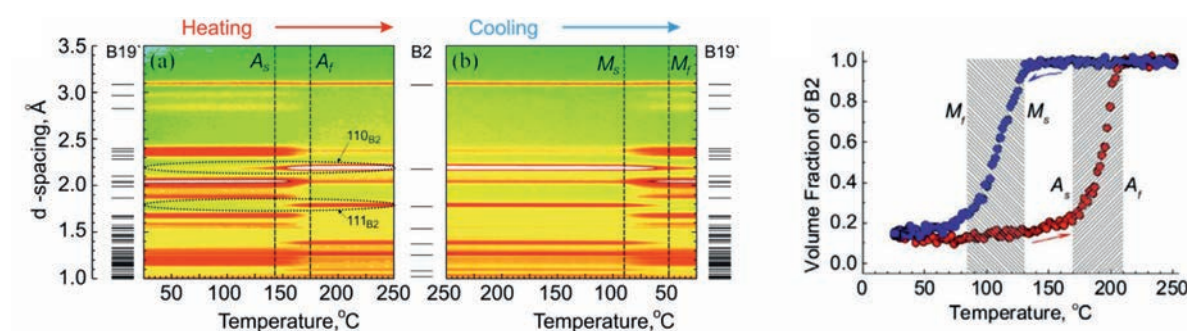


Рис. 2. а) Эволюция нейтронных дифракционных спектров сплава  $Ti_{29,7}Ni_{50,3}Hf_{20}$  при изменении температуры. б) Температурные зависимости объёмов элементарной ячейки мартенсита B19' и аустенита B2.

тупе ФДВР, который может функционировать как в режиме высокого разрешения для прецизионного изучения структурных особенностей материала, так и в режиме высокой светосилы для *in situ* исследований переходных процессов.

Нейтронографические исследования сплава  $Ti_{29,7}Ni_{50,3}Hf_{20}$  позволили установить структурные параметры низкотемпературного B19' мартенсита и высокотемпературного B2 аустенита и температуры прямого и обратного мартенситного превращения [1] (Рис. 2). Тензор линейного теплового расширения мартенсита содержит отрицательный коэффициент [2]. Объёмный эффект прямого B2 → B19' превращения в этом сплаве составляет 0.75%, более чем в 6 раз выше, чем в  $Ti_{50,1}Ni_{49,9}$ . Было обнаружено, что ≈13.0 об.% аустенита не участвуют в мартенситном превра-

жении. Значительное расхождение экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных величин восстанавливаемых деформаций может быть связано с присутствием остаточного аустенита и большим объёмным эффектом превращения [1].

Аналогичные исследования были проведены для четверного сплава  $Ti_{29,7}Ni_{50,3}Hf_{10}Zr_{10}$ . В нём одновременно с протеканием обратного мартенситного превращения был обнаружен эффект перехода аустенита из частично упорядоченного состояния в полностью упорядоченную B2 фазу [3]. Поскольку длина рассеяния тепловых нейтронов титаном отрицательна, дифракция нейтронов оказывается предпочтительным методом исследования эффектов упорядочения в подобных сплавах.