

Влияние охлаждения на возникновение намагниченности в никелиде титана*А.В. Достовалов¹, Ф.М. Носков¹, В.С. Жигалов², А.В. Нявро³*¹Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)²Институт физики им. Л.В. Киренского (Красноярск, Россия)³Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)**Effect of Cooling on the Occurrence of Magnetization in Titanium Nickelide***A.V. Dostovalov¹, F.M. Noskov¹, V.S. Zhigalov², A.V. Nyavro³*¹Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)²Institute of Physics L.V. Kirenskiy (Krasnoyarsk, Russia)³National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

Вопрос возникновения намагниченности в сплавах системы никель-титан до сих пор изучен недостаточно. Наши ранние работы показали возможность возникновения намагниченности при многократных циклах прямых и обратных мартенситных переходах в сплаве $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49}$, а также после деформации этого сплава растяжением до разрыва. Представленная работа посвящена выявлению эффекта намагниченности в образцах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49}$ в результате их однократного охлаждения в жидком азоте, а также исчезновению намагниченности при нагревании образцов до комнатной температуры. С помощью индукционного петлескопа выявлено, что непосредственно после охлаждения образец имел высокую намагниченность. По мере нагревания образца петли гистерезиса изменяются, приобретая меньший наклон к горизонтальной оси, что свидетельствует об уменьшении магнитной индукции практически до нуля с повышением температуры до комнатной. Причину появления и исчезновения намагниченности можно связать с микродеформационными процессами, проходящими при охлаждении и нагревании образцов, связанными с прямым и обратным мартенситными переходами.

Ключевые слова: никелид титана, ферромагнетизм, микродеформации, магнитометрия, структура и свойства.

DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-02

Введение

Нанокристаллические и ультрамелкозернистые сплавы Ti-Ni благодаря высокой прочности, хорошей пластичности и повышенной функциональной стабильности являются основными материалами для различных систем медицинского назначения.

The occurrence of magnetization in alloys of the nickel-titanium system is still studied insufficiently. Our early work showed the possibility of magnetization arising during multiple cycles of forward and reverse martensitic transitions in the $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49}$ alloy, as well as after deformation of this alloy by tensile stress to rupture. The purpose of this paper is devoted to revealing the effect of magnetization in samples of the $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49}$ alloy as a result of their single cooling in liquid nitrogen, as well as the disappearance of magnetization when the samples are heated to room temperature. Using an induction hysteresigraph it is found out that the sample has a high magnetization immediately after cooling. As the sample is heated, the hysteresis loops change, acquiring a smaller inclination to the horizontal axis. It indicates a decrease in the magnetic induction to almost zero as the temperature rises to room temperature. The reason for the occurrence and disappearance of magnetization can be associated with micro-deformation processes related to forward and reverse martensitic transitions during cooling and heating of the samples.

Key words: Ni-Ti alloy, ferromagnetism, microstrains, magnetometry, structure and properties.

Обнаружение эффекта возникновения магнетизма в деформированных образцах сплава $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49}$ позволяет в перспективе создать на его основе смарт-материалы, работа которых будет реализована путем воздействия и контроля состояния с помощью электромагнитных полей.

Никелиду титана посвящено достаточно много работ и обзоров [1, 2, 3, 4], однако вопрос, связанный с возможностью возникновения намагниченности в этом сплаве, до сих пор остается без ответа.

Существуют данные для отдельных интерметаллидных фаз системы никель-титан. Так, в работе [5] приведены расчеты плотности электронных состояний для фазы Ni_4Ti_3 , из которых видно, что плотность электронных состояний на уровне Ферми высокая, что отвечает критерию Стонера для возникновения намагниченности. То есть возникновение намагниченности может быть вызвано фазообразованием при механохимической реакции [6].

Одна из гипотез появления ферромагнитных свойств в сплаве $Ni_{51}Ti_{49}$ после пластических деформаций связана со снижением симметрии кристаллической фазы с кубической решеткой [7, 8].

Ранее мы исследовали с помощью торсионного магнитометра магнитное состояние образцов после различного числа циклических мартенситных превращений. Полученные данные показали появление намагниченности в образцах $Ni_{51}Ti_{49}$ [9]. Ферромагнитная фаза распределена в образце неоднородно. Мы предположили, что процессы появления ферромагнитных свойств являются результатом повторных циклов прямых и обратных мартенситных переходов в сплавах Ni-Ti. Это может привести к изоляции ферромагнитных частиц, богатых никелем, благодаря механизмам, изложенным в [10, 11].

В другой нашей работе исследовали с помощью магнитного петлескопа образцы, подвергнутые растяжению до разрыва при испытании в разрывной машине [12]. В этом случае намагниченность возникала в результате однократного воздействия пластической деформации.

Представляет интерес, приведет ли однократный мартенситный переход, вызванный помещением образца в жидкий азот в сплаве $Ni_{51}Ti_{49}$, к появлению намагниченности.

Цель работы: выявить влияние охлаждения образцов $Ni_{51}Ti_{49}$ в жидком азоте на возникновение в нем намагниченности.

1. Образцы и методы

Исходные прутки сплава $Ni_{51}Ti_{49}$ подвергались прокатке в калибрах при температуре 800 °С. Методом электроискровой резки вырезались образцы в форме двойных лопаток. Отжиг и закалка образцов для изучения изменений в структуре проводились в камерной электропечи. Образцы помещались в печь после ее предварительного нагрева. Нагрев образцов проводился до температуры отжига 950 °С±20 °С с выдержкой в течение одного часа и охлаждением до комнатной температуры в печи. Отожженные образцы закалялись в воде с температуры 850 °С после выдержки в печи в течение часа.

Подготовленные таким образом образцы сплава $Ni_{51}Ti_{49}$ однократно помещали в кювету с жидким азотом на 80 с. После извлечения из кюветы образцы помещали в индукционный петлескоп для исследования магнитных характеристик образцов в процессе их нагрева до комнатной температуры.

Индукционный петлескоп предназначен для измерения петель гистерезиса для образцов с намагниченностью от 20 Гс (в том числе с тонких магнитных пленок). Схема прибора приведена на рисунке 1.

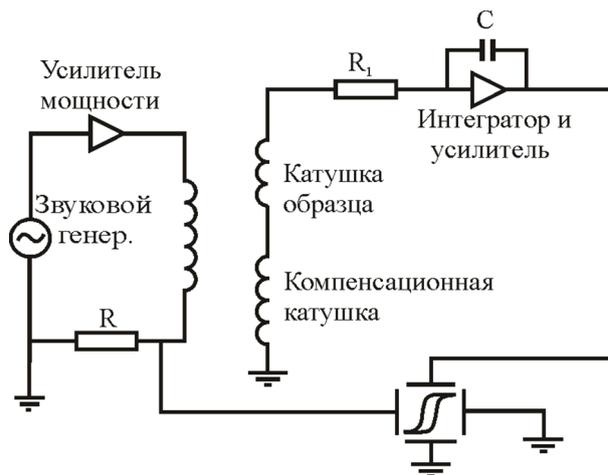


Рис. 1. Блок-схема индукционного петлескопа [13]

2. Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведена диаграмма равновесного состояния системы титан-никель, согласно диаграмме сплав может быть ферромагнитен при содержании титана не более 10 ат. %.

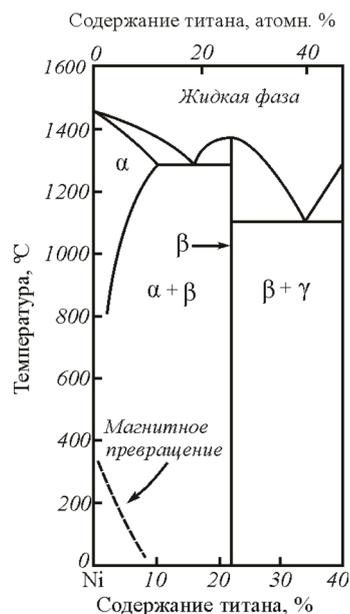


Рис. 2. Диаграмма фазовых равновесий системы Ni-Ti с областью магнитных превращений [14]

Эффект возникновения намагниченности наблюдали в результате однократного погружения недеформированного образца никелида титана в жидкий азот.

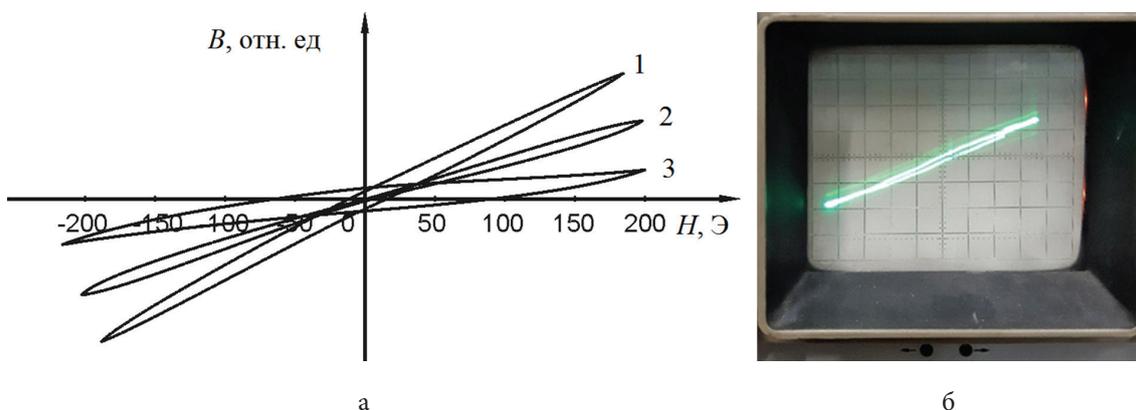


Рис. 3. Петли гистерезиса сплава $Ni_{51}Ti_{49}$; а — на различных стадиях нагревания от температуры жидкого азота до комнатной температуры (1, 2, 3); б — фотография экрана петлескопа, на котором видна петля гистерезиса в положении 2

На рисунке 3 представлены изменения петель гистерезиса во времени, проходящем от извлечения образца из жидкого азота до нагревания его до комнатной температуры (1, 2, 3). Наблюдали, что сразу после извлечения из жидкого азота образец имеет намагниченность, которая падает по мере нагревания его до комнатной температуры, так что при комнатной температуре магнитные свойства исчезают.

Сопоставляя данные, полученные с индукционного петлескопа, можно увидеть, что недеформированный сплав $Ni_{51}Ti_{49}$ может иметь ферромагнитные свойства только при низких температурах. При самой низкой температуре (1 на рис. 3) материал имеет самую высокую намагниченность. По мере нагревания образца он начинает размагничиваться, так как петли гистерезиса 2, 3 имеют меньший наклон, и при достижении комнатной температуры петля гистерезиса становится практически горизонтальной, что соответствует уменьшению магнитной индукции практически до нуля.

Эффект появления и исчезновения намагниченности можно связать с микродеформационными про-

цессами, проходящими при охлаждении и нагревании образцов. При охлаждении до температуры жидкого азота металлического образца в нем возникают микропластические деформации, вызванные прямым и обратным мартенситными превращениями [15]. Тогда причиной появления-исчезновения намагниченности в охлажденных образцах сплава $Ni_{51}Ti_{49}$ являются атомные смещения, проходящие при охлаждении-нагревании сплава в процессе обработки его жидким азотом. Поведение образца может свидетельствовать о таком свойстве, как магнитоупругость.

Выводы

1. Обнаружен эффект появления намагниченности в образцах $Ni_{51}Ti_{49}$ при погружении их в жидкий азот.
2. Причину появления и исчезновения намагниченности можно связать с микродеформационными процессами, вызванными прямым и обратным мартенситным переходами, проходящими при охлаждении и нагревании образцов.

Авторы благодарят профессора кафедры МиТОМ ПИ СФУ Квеглис Л.И. за полезные обсуждения.

Библиографический список

1. Гюнтер В.Э., Ясенчук Ю.Ф., Клопотов А.А., Ходоренко В.Н. Физико-механические свойства и структура сверхэластичных пористых сплавов на основе никелида титана // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 1.
2. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцова З.П. Эффект памяти формы. Л., 1987.
3. Панченко Е.Ю. Закономерности термоупругих мартенситных превращений, механизмы эффекта памяти формы и сверхэластичности в гетерофазных монокристаллах никелида титана : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07. Томск, 2004.
4. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Ясенчук Ю.Ф. и др. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения. Томск, 2006.
5. Кулькова С.Е., Валуйский Д.В., Смолин И.Ю. Изменения электронной структуры при В2-В19' мартенситном

превращении в никелиде титана // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. № 4.

6. Takacs L. Mechanochemistry and the Other Branches of Chemistry: Similarities and Differences // Acta physica polonica A. 2012. Vol. 121. № 3.

7. Khomskii D.I., Kugel K.I., Sboychakov A.O., Streltsov S.V. Role of local geometry in the spin and orbital structure of transition metal compounds // JETP. 2016. Vol. 122. № 3.

8. Gudenough J.B. Magnetism and the Chemical Bond. New York, 1963.

9. Abylkalykova R.B., Tazhibaeva G.B., Noskov F.M., Kveglis L.I. Features of martensitic transformation in NiTi // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2009. Vol. 73. № 11.

10. Panin V.E., Egorushkin V.E. Curvature Solitons as Generalized Structural Wave Carriers of Plastic Deformation and Fracture // Phys. Mesomech. 2013. Vol. 16. №. 4.

11. Panin V.E. Egorushkin V.E. Fundamental role of local curvature of crystal structure in plastic deformation and fracture of solids // AIP Conference Proceedings 1623:1.

12. Носков Ф.М., Нявро А.В., Черепанов В.Н., Дроздова А.К., Квеглис Л.И. Магнитные свойства в пластически деформированном никель-титановом сплаве // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 18. № 1.

13. Жигалов В.С., Варнаков С.Н., Полякова К.П. и др. Методы получения магнитных слоев и исследования их физических свойств : учеб. пособие. Красноярск, 2008.

14. Бозорт Р.М. Ферромагнетизм : пер. с англ / под ред. Е.И. Кондорского и Б.Г. Лившица. М., 1956.

15. Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Канель Г.И., Кашин О.А., Раточка И.В. Поведение никель-титановых сплавов с эффектом памяти формы в условиях ударно-волнового нагружения // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. Вып. 4.