

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа поддержана грантом президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ, код проекта НШ-3550.2012.3

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Khudayakov V.V., Meshcheryakova Y.V., Baronin G.S.  
THERMAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FLUOROPOLYMER MOLECULAR COMPOSITES

Thermo-physical and tribological properties of fluoropolymer molecular composites are studied. The experimental dependence, from which it follows that the greatest effect is observed in the area of small additions (up to 1 m h to 100 m h PTFE), the experimental results are explained by the transition from a single-phase system in a multi-phase, and points to the extreme point of the metastable state system where the system has the highest homogeneity.

*Key words:* tribological and thermal properties; nanocomposites based on fluoropolymer; gas phase mixing; metal and ceramic nanoparticles.

УДК 539.3

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ И ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

© О.М. Остриков, Е.В. Шматок

*Ключевые слова:* двойникование; мартенсит; магнитный сплав с памятью формы.

Методом индентирования поверхности пирамидой Виккерса изучено двойникование и локальное разрушение сплавов Гейслера  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ . В аустенитной фазе данного сплава впервые обнаружен процесс образования каналов Розе и дендритных трещин. Установлено, что в мартенситной фазе у отпечатка индентора на поверхности (100) монокристалла  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  образуются группы параллельных двойников линзовидной формы.

Металлические монокристаллы на основе  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  являются перспективными в плане практического использования магнитными материалами с памятью формы. Данные сплавы были открыты в 1903 г. немецким химиком и металлургом Фридрихом Гейслером, который обнаружил, что сплав бронзы с химическими элементами типа Sn, Al, Sb, В или Ві может кристаллизоваться в ферромагнитные сплавы, хотя сами составляющие элементы не являлись ферромагнитными [1].

Огромный интерес к экспериментальным и теоретическим исследованиям семейства сплавов Гейслера непосредственно связан с рядом их уникальных свойств, которые проявляются в области структурного перехода при изменении внешних факторов, таких как температура, магнитное поле, давление. К данным свойствам можно отнести следующие: эффект памяти формы, магнитный эффект памяти формы, сверхупругость, сверхпластичность, гигантские обратимые магнитодеформации [2–6]. Данные свойства позволяют применять сплавы Гейслера в качестве различных функциональных материалов, таких как термо чувствительные силовые элементы, различного рода фиксаторы в медицине, а также в качестве рабочего тела в технологиях магнитного охлаждения [2, 4].

Целью данной работы стало изучение особенностей пластической деформации, формирования каналов Розе и разрушения монокристаллов  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  при микроиндиционировании поверхности алмазной пирамидой Виккерса.

Источником напряжений в данной работе выступал индентор Виккерса, у отпечатка которого на поверхности (100) мартенситной фазы монокристалла  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  возникал ансамбль тонких линзовидных двойников, увеличенное изображение которых представлено на

рис. 1. Видно, что двойники не имеют равную длину и расположены на разном расстоянии друг от друга.

После тысячи циклов нагрузки-разгрузки в аустенитной фазе монокристалла  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  наблюдается изменение деформационной картины у отпечатка индентора, которое проявилось в образовании трещин и каналов Розе [7], представленных на рис. 2, и которых в недеформированном циклической нагрузкой монокристалле не наблюдалось. В данном процессе зарождения трещин у отпечатка индентора можно выделить следующие этапы: 1) скольжение, способствующее зарождению каналов Розе; 2) образование каналов Розе; 3) перерождение каналов Розе в микротрещины.

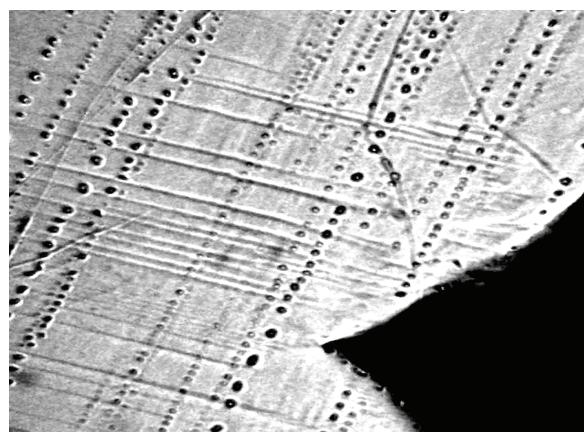
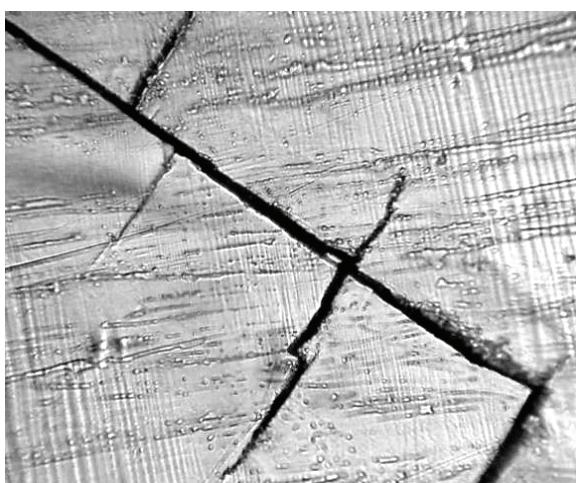


Рис. 1. Группы параллельных тонких линзовидных двойников у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) в мартенситной фазе  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  (оптическая микроскопия  $\times 500$ )



**Рис. 2.** Система трещин у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) в аустенитной фазе  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  (стрелкой показаны каналы Розе)



**Рис. 3.** Дендритная трещина в аустенитной фазе монокристалла  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  ( $\times 100$ )

Также в результате исследования образца был установлен любопытный факт образования дендритной трещины (рис. 3). Отличительной чертой такой трещины является то, что ее ветви располагаются под прямым углом к главной (более широкой) – стволовой трещине.

Таким образом, в результате изучения особенностей двойникования и разрушения монокристаллического сплава  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  при индентировании его поверхности (100) у отпечатка пирамиды Виккерса были впервые обнаружены системы параллельных двойников в мартенситной фазе и трещины, каналы Розе в аустенитной фазе. Установлено, что трещины могут иметь дендритный вид.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Planes A., Manosa L., Acet M.* Magnetocaloric effect and its relation to shape-memory properties in ferromagnetic Heusler alloys // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2009. V. 21. P. 233201-233229.
2. *Webster P.J., Ziebeck K.R.A.* Heusler alloys // *Alloys and Compounds of d-Elements with Main Group Elements. Part 2. Landolt-Bornstein-Group III Condensed Matter.* V. 19. Berlin: Springer, 1988. P. 75-79.
3. *Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т.* Ферромагнетики с памятью формы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 6. С. 577-608.
4. *Entel P., Buchelnikov V.D., Khovailo V.V.* Modelling the phase diagram of magnetic shape memory Heusler alloys // *J. of Physics D: Appl. Physics.* 2006. V. 39. P. 865-889.
5. *Бучельников В.Д., Васильев А.Н., Коледов В.В.* Магнитные сплавы с памятью формы: фазовые переходы и функциональные свойства // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 8. С. 900-906.
6. *Planes A., Manosa L.* Ferromagnetic shape memory alloys // *Materials Science Forum.* 2006. V. 512. P. 145-152.
7. *Финкель В.М., Федоров В.А., Королев А.П.* Разрушение кристаллов при механическом двойниковании. Ростов н/Д, 1990. 172 с.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Авторы благодарят научного руководителя «AdaptaMat Ltd.» (Финляндия, Хельсинки) А.Л. Созинова за любезно предоставленные образцы  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ .

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Ostrikov O.M., Shmatok E.V. FEATURES MECHANICAL TWINNING AND LOCAL DESTRUCTION OF SINGLE CRYSTAL ALLOY  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  AT ITS SURFACES INDENTATION

By indentation surfaces method by pyramid of Vickers the twinning and local destruction of alloys of Heisler  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  is studied. For the first time in austenite phase of the given alloy the process of formation of channels to Rose and dendrite cracks is found out. It is established that in martensit phase at a print indenter on a surface (100) single crystals  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  the groups of parallel twins lens form are developed.

*Key words:* twining; martensit; shape memory magnetic alloys.