

# МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 669.76:620.186.4

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ, ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛОВ РОЗЕ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $Ni_2MnGa$ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ ПИРАМИДОЙ ВИККЕРСА

О. М. ОСТРИКОВ<sup>\*</sup>, Е. В. ШМАТОК

УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», пр. Октября, 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

*Методом индентирования поверхности пирамидой Виккерса исследовано двойникование и локальное разрушение сплавов Гейслера  $Ni_2MnGa$ . 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  $Ni_2MnGa$  образуются группы параллельных двойников линзовидной формы.*

### Введение

Магнитные материалы с памятью формы (сплавы Гейслера) благодаря своим уникальным физическим и физико-механическим свойствам находят все более широкое практическое применение в различных областях электротехники, медицины, нанотехнологии и приборостроения. Эти материалы открывают новые возможности для технологий миниатюризации изделий [1–5].

Интерес к магнитным материалам с памятью формы начал расти после открытия бездиффузионных фазовых превращений, происходящих под воздействием магнитного поля с индукцией до 1 Тл [4–6]. Величина удлинения образца при этом составляла 1–10% [4–6]. В настоящее время появились первые коммерческие образцы магнитоуправляемых актюаторов, в которых монокристаллы  $Ni_2MnGa$  используются как функциональный материал [5].

Экспериментальными методами широко исследованы физические свойства  $Ni_2MnGa$  [1–11]. Так в работе [1] исследован эффект запоминания формы в поликристаллическом  $Ni_2MnGa$ . Было установлено, что величина эффекта в нем в два раза меньше, чем в монокристаллическом  $Ni_2MnGa$  [4]. В [2] изучалось изменение намагниченности монокристаллического  $Ni_2MnGa$  в зависимости от его деформации. Структурные исследования  $Ni_2MnGa$  проводились в [3, 4]. Были определены различия параметров кристаллической решетки  $Ni_2MnGa$  в

аустенитном и мартенситном состоянии. Температурная зависимость эффекта памяти формы изучена в [10]. Обобщению результатов посвящены обзоры [7–9]. При этом, несмотря на важность и актуальность, механическое двойникование и локальное разрушение  $Ni_2MnGa$  изучено недостаточно.

Цель работы – изучение особенностей пластической деформации, формирования каналов Розе и разрушения монокристаллов  $Ni_2MnGa$  при микроиндентировании поверхности алмазной пирамидой Виккерса.

### Методика эксперимента

Монокристаллы сплава Гейслера ( $Ni_2MnGa$ ) получали методом Бриджмена. Форма призмы образцам придавалась путём вырезания электроискровым способом вдоль заданных кристаллографических направлений. Далее проводилась обработка поверхности призм полированием [4].

Локальная деформация поверхности монокристаллов  $Ni_2MnGa$  осуществлялась с помощью прибора ПМТ-3 при комнатной температуре в отсутствие магнитного поля. Перед помещением монокристалла на столик прибора, образец подвергался растяжению (путем помещения в магнитное поле индукцией 1 Тл), либо сжатию (с помощью микрометра), для получения аустенитной или мартенситной фазы.

Микроиндентирование поверхности проводилось алмазной пирамидой Виккерса прибора ПМТ-3 в диапазоне нагрузок на индентор до 2,0 Н. С помощью этого прибора велась оптическая микроскопия дефектов, возникающих у отпечатка индентора.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *а* показано исходное состояние поверхности. Деформационная картина, возникающая у отпечатка индентора на поверхности (100) монокристалла  $Ni_2MnGa$ , находящегося в мартенситной фазе, показана на рис. 1, *б*. Особенностью этой картины является наличие систем параллельных друг другу тонких двойников, имеющих в плоскости (100) вид линзы. В отличие, например, от клиновидных двойников, возникающих у отпечатка индентора на поверхности (111) монокристаллов висмута [12, 13], представленные на рис. 1, *б* двойники образуются вдали от отпечатка индентора, что в случае индентирования кристаллов висмута наблюдается редко [12, 13].

Интересно рассмотрение взаимодействия линзовидных двойников в  $Ni_2MnGa$  с остаточными двойниковыми прослойками, образовавшимися в результате сжатия образца до индентирования (рис. 1, *б*). Тонкие линзовидные деформационные двойники, образовавшиеся в процессе индентирования, могут группами формироваться внутри

двойниковой прослойки. При этом направление развития линзовидных двойников может быть как параллельным (стрелка 1 на рис. 1, *б*), так и перпендикулярным (стрелки 2 на рис. 1, *б*) границам остаточных двойниковых прослоек.

На рис. 2 представлено увеличенное изображение параллельных линзовидных двойников в области отпечатка пирамиды Виккерса. Как видно из рис. 2, двойники не имеют равную длину и расположены на разном расстоянии друг от друга. На рис. 2, *а* показан искривленный двойник. В области искривления границы такого двойника некогерентные (рис. 3), что является механизмом перехода из одной плоскости двойникования в другую. Некогерентность двойниковых границ указывает на появление на них частичных двойнивающих дислокаций, что способствует росту возле таких границ уровня внутренних напряжений [12].

Перевод монокристалла  $Ni_2MnGa$  из мартенситного в аустенитное состояние приводит к изменению деформационной картины у отпечатка индентора (рис. 4, *а*). Механическое двойникование, как правило, не проявляется. На смену ему приходит скольжение (черные стрелки на рис. 4, *а*). Наблюдается развитие в четырех направлениях типа  $\langle 011 \rangle$  трещин и каналов Розе (белые стрелки на рис. 4, *а* и *б*). Было установлено, что с ростом нагрузки на индентор длина трещин линейно растет, а их количество практически не увеличивается.

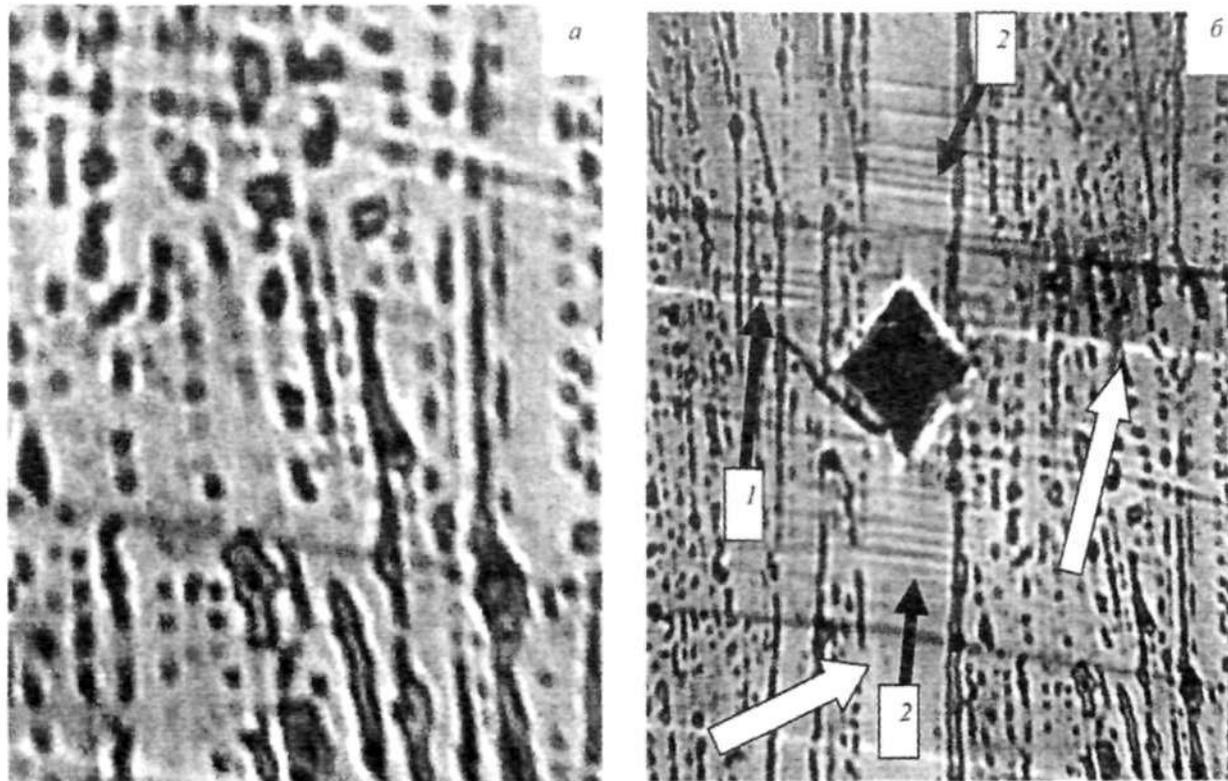


Рис. 1. Деформационная картина у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) монокристалла  $Ni_2MnGa$ , находящегося в мартенситной фазе: *а* – исходное состояние поверхности ( $\times 400$ ); поверхность, деформированная индентором (черными стрелками показаны линзовидные двойники, белыми – остаточные двойниковые прослойки этой же системы двойникования, но возникшие в кристалле до индентирования) ( $\times 100$ )

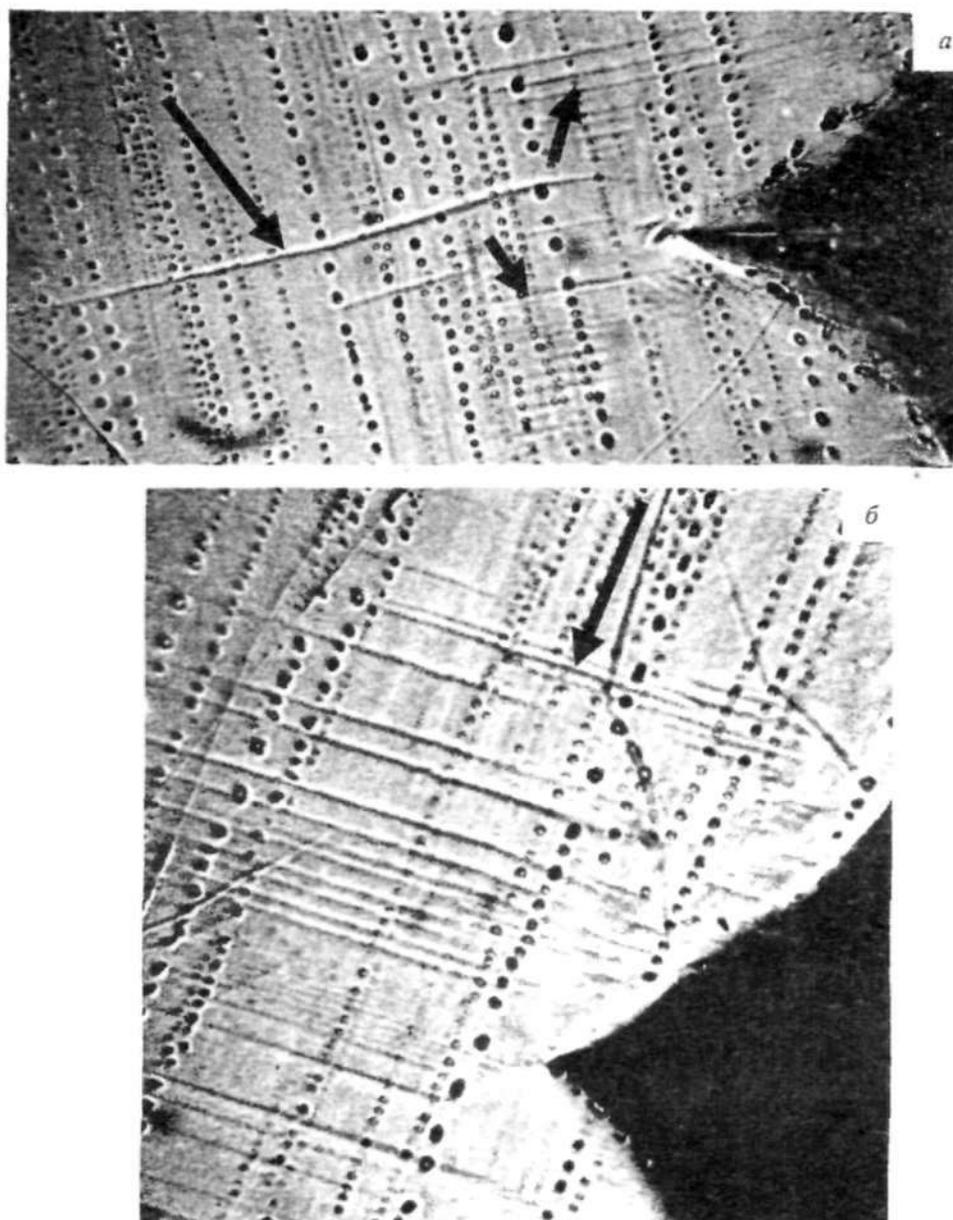


Рис. 2. Увеличенное изображение групп параллельных тонких линзовидных двойников у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) монокристалла  $Ni_2MnGa$ : а –  $\times 300$ ; б –  $\times 500$

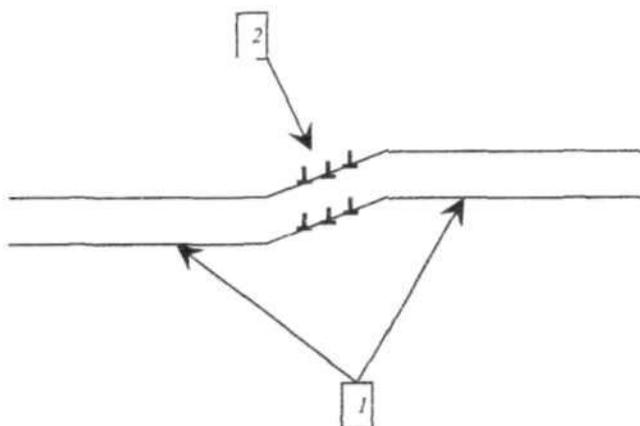
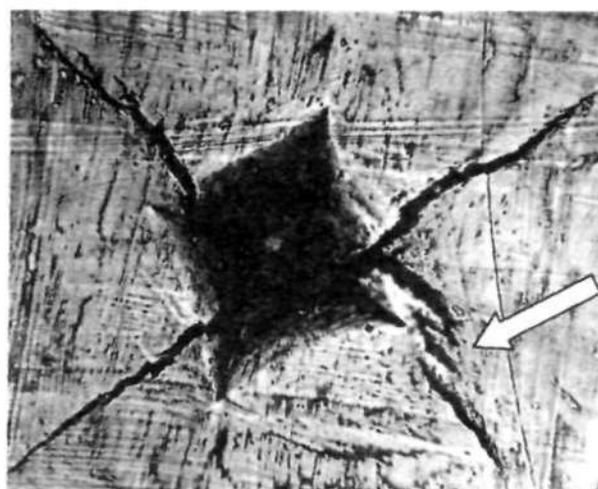


Рис. 3. Схематическое изображение искривленного участка двойника:  
 – часть двойника с когерентными границами, 2 – участок двойника с некогерентными границами



а



б



в

Рис. 4. Система трещин у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) монокристалла  $Ni_2MnGa$  в аустенитной фазе. Белыми стрелками показаны каналы Розе, черными – следы скольжения: а – типичная деформационная картина у отпечатка индентора на поверхности (100) аустенитной фазы монокристалла  $Ni_2MnGa$ ; б – увеличенное изображение трещины и каналов Розе; в – параллельные трещины, одна из которых зародилась вдали от отпечатка индентора)

В процессе локального разрушения при индентировании первично образование каналов Розе и вторичность зарождения трещин. При этом в механизме разрушения можно выделить следующие стадии: 1) скольжение, способствующее за-

рождению каналов Розе; 2) образование каналов Розе; 3) перерождение каналов Розе в микротрещины [14].

Трещины в аустенитном  $Ni_2MnGa$  часто бывают криволинейными, ветвящимися (рис. 4, а и б). На рис. 4, в показано раздвоение трещины, вызванное наличием неоднородности на пути развития трещины.

Интересен представленный на рис. 5 факт возможности образования дендритной трещины. При этом ветви такой трещины располагаются под прямым углом к стволу трещины. Ширина стволу трещины, как правило, больше ширины ветвей.

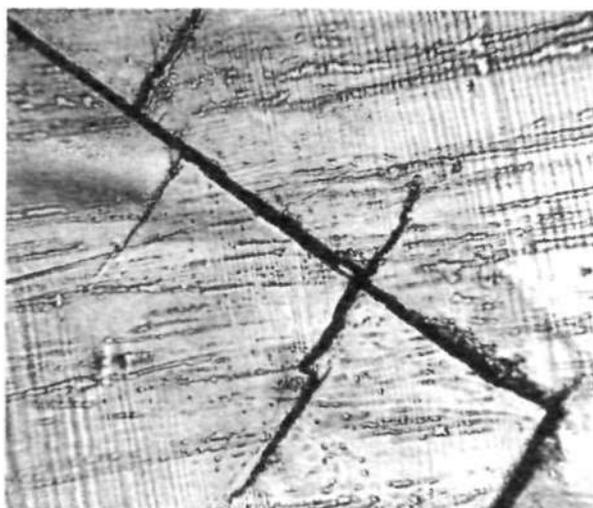


Рис. 5. Дендритная трещина в аустенитной фазе монокристалла  $Ni_2MnGa$  ( $\times 100$ )

После перевода аустенитного монокристалла  $Ni_2MnGa$  в мартенситное состояние образовавшиеся в аустените трещины в областях, подверженных пластической деформации, преимущественно не залечиваются. Это дает возможность наблюдать в мартенситной фазе  $Ni_2MnGa$  закономерности взаимодействия трещин с механическими двойниками (рис. 6).

На рис. 6, а показана область встречи вершины двойника с вершиной трещины. Угол вершины двойника имеет величину большую нуля, что наблюдается при наличии стопора на пути развития двойника [13]. В данном случае в качестве такого стопора выступила пластически деформированная область у вершины трещины.

В приведенном на рис. 6, а случае в двойнике у вершины наблюдается набор полос. Одной из причин образования таких полос является движение двойникующих дислокаций от вершины двойника в сдвойникованную область. В связи с чем, данные полосы представляют собой области раздвойникования. Такое движение двойникующих дислокаций возможно после снятия нагрузки и при наличии у вершины трещины внутренних напряжений, приводящих к появлению сил, действующих на двойникующие дислокации в направ-

лении сдвойникового объема. Другой причиной может быть рассмотренное в [12] огибание двойником стопоров.

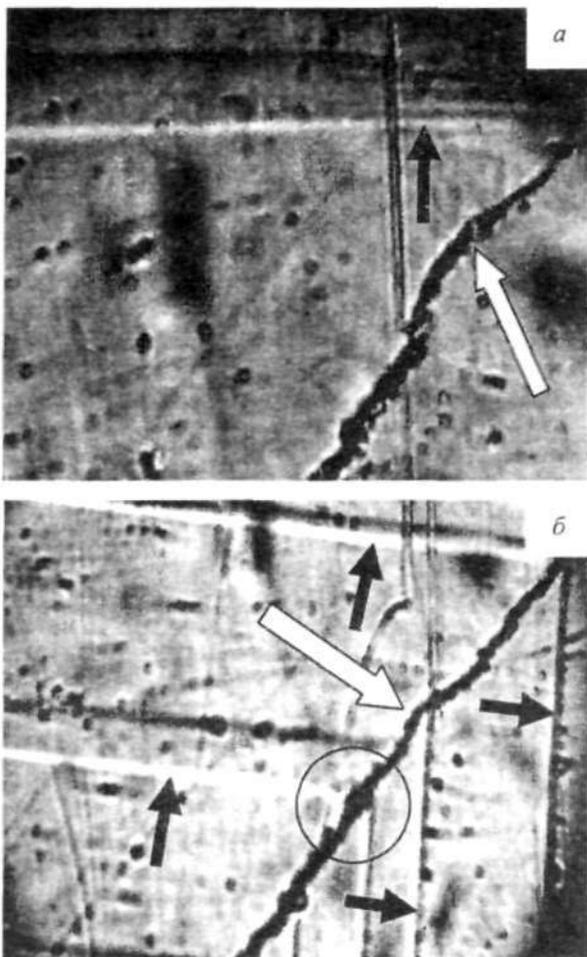


Рис. 6. Картина взаимодействия механических двойников и трещин в мартенситной фазе монокристалла  $Ni_2MnGa$ : а – взаимодействие вершины двойника с вершиной трещины; б – взаимодействие двойников с трещиной (черными стрелками показаны механические двойники, белыми – трещины)

На рис. 6, б трещина выступает в качестве препятствия для развития двойников. В выделенной на рис. 6, б кругом области у трещины находятся два двойника разных кристаллографических направлений. Такая конфигурация способна образоваться либо в случае встречного движения двойников, либо вследствие остановки одного двойника у одного края трещины и генерации двойниующих дислокаций у другого края трещины под действием напряжений двойника. Такая генерация двойниующих дислокаций под действием внешних напряжений способна привести к формированию нового двойника.

#### Выводы

Таким образом, методом локального деформирования алмазной пирамидой Виккерса поверхности монокристаллического сплава  $Ni_2MnGa$  изучены особенности его двойникования и разру-

шения. В сплаве  $Ni_2MnGa$ , находящемся в аустенитном состоянии, впервые обнаружены каналы Розе. Показано, что двойники в монокристаллическом  $Ni_2MnGa$  образуются при индентировании при нахождении его в мартенситном состоянии. При этом канал пластической деформации двойникованием реализуется путем образования системы тонких линзовидных параллельных друг другу двойников, находящихся вдали от отпечатка индентора. При индентировании аустенитной фазы монокристаллического  $Ni_2MnGa$  образуются трещины и каналы Розе. Трещины могут иметь дендритный вид. При переводе сплава  $Ni_2MnGa$  из аустенитной в мартенситную фазу образовавшиеся в аустенитной фазе трещины не всегда исчезают, что позволяет наблюдать процесс взаимодействия трещин с механическими двойниками мартенситной фазы.

Авторы благодарят научного руководителя «Adaptamat» Ltd. А.Л. Созинова за любезно предоставленные образцы. Работа поддержана БР ФФИ (грант Ф13-021).

#### Литература

- Roth, S. Magneto-mechanical behaviour of textured Polycrystals of NiMnGa ferromagnetic Shape Memory Alloys / S. Roth, U. Gaitzsch, M. Potschke, L. Schultz // *Advanced Materials Research*. – 2008. – V. 52. – P. 29–34.
- Mullner, P. Stress-induced twin rearrangement resulting in change of magnetization in a Ni–Mn–Ga ferromagnetic martensite / P. Mullner, V.A. Chernenko, G. Kostorz // *Scripta Materialia*. – 2003. – V. 49. – P. 129–133
- Степанова, Н.Н. Фазовый состав и механические свойства сплава Гейслера  $Ni_2MnGa$ , легированного железом и вольфрамом / Н.Н. Степанова, Д.П. Родионов, В.А. Казанцев, В.А. Сазонова, Ю.И. Филиппов // *Физика металлов и металловедение*. – 2007. – Т. 104, № 6. – С. 661–667.
- Sozinov, A. Stress- and magnetic-field-induced variant rearrangement in Ni–Mn–Ga single crystals with seven-layered martensitic structure / A. Sozinov, A.A. Likhachev, N. Lanska, O. Soderberg, K. Ullakko, V.K. Lindroos // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – V. 378. – P. 399–402.
- Henry, C.P., Ac field-induced actuation of single crystal Ni–Mn–Ga / C.P. Henry, D. Bono, J. Feuchtwanger, S.M. Allen, R.C. O’Handley // *Journal of applied physics*. – 2002. – V. 91, N. 10. – P. 7810–7811.
- Heczko, O. Magnetic properties and domain structure of magnetic shape memory Ni–Mn–Ga alloy / O. Heczko, K. Jurek, K. Ullakko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2001. – Vol. 226–230. – P. 996–998.
- Васильев, А.Н. Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги // *Успехи физических наук*. – 2003. – Т. 173, № 6. – С. 577–608.
- Бучельников, В.Д. Магнитные сплавы с памятью формы: фазовые переходы и функциональные свойства / В.Д. Бучельников, А.Н. Васильев, В.В. Коледов // *Успехи физических наук*. – 2006. – Т. 176, № 8. – С. 900–906.
- Planes, A. Ferromagnetic shape memory alloys / A. Planes, L. Manosa // *Materials Science Forum*. – 2006. – Vol. 512. – P. 145–152.
- Heczko, O. Temperature dependence and temperature limits of magnetic shape memory effect / O. Heczko, L. Straka // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 94, N 11. – P. 7139–7143.
- Hirsinger, L. Modelling detwinning of martensite platelets under magnetic and stress actions on Ni–Mn–Ga alloys / L. Hirsinger, C. Lexcellent // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2003. – V. 254–255. – P. 275–277.

12. Остриков, О.М. Механика двойникования твердых тел: монография / О.М. Остриков. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2008. – 301 с.
13. Остриков, О.М. Некоторые особенности формы клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О.М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 90, № 1. – С. 91–95.
14. Финкель, В.М. Разрушение кристаллов при механическом двойниковании / В.М. Финкель, В.А. Федоров, А.П. Королев. – Ростов-на-Дону. – 1990. – 172 с.

---

Ostrikov O. M. and Shmatok E. V.

**Features mechanical twin, local destruction and formation of channels to the Rose in monocrystals Ni<sub>2</sub>MnGa at indentation their surfaces a pyramid of Vickers.**

By method indentation surfaces a pyramid of Vickers it is investigated twin and local destruction of alloys of Heislars Ni<sub>2</sub>MnGa. In austenitic to a phase of the given alloy process of formation of channels to the Rose and branches cracks for the first time is found out. It is established that in martensit to a phase at a print indenter on a surface (100) monocrystals Ni<sub>2</sub>MnGa are formed groups of parallel twins lens kind forms.

*Поступила в редакцию 03.05.2013*

© О. М. Остриков, Е. В. Шматок, 2013.