

УДК 539.3

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ МАРТЕНСИТНОЙ ФАЗЫ МОНОКРИСТАЛЛА Ni_2MnGa ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ (100) ПИРАМИДОЙ ВИККЕРСА

О. М. ОСТРИКОВ, Е. В. ШМАТОК

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Магнитные монокристаллы Ni_2MnGa , относящиеся к группе сплавов Гейслера, обладают уникальными физико-механическими свойствами, обусловленными эффектом запоминания формы [1]–[3]. Этот эффект полностью определяется характером перемещения границы раздела аустенит/мартенсит [3]. В плане практического использования рассматриваемых материалов интересны и их физико-механические свойства, проявляющиеся не только в процессе бездиффузионного фазового перехода. Пластическая деформация монокристаллов Ni_2MnGa , как и у других металлических монокристаллов, определяется характером протекания процессов двойникования и скольжения [4].

Целью данной работы стало выявление и анализ закономерностей механического двойникования монокристаллического Ni_2MnGa при дозированном деформировании его поверхности (100) алмазной пирамидой Виккерса.

Методика эксперимента

Монокристаллы Ni_2MnGa выращивались методом Бриджмена. Призматические образцы получали электроискровой резкой с последующей полировкой поверхности.

Деформирование поверхности (100) производилось с помощью алмазной пирамиды Виккерса прибора ПМТ-3. Изучалась деформационная картина вокруг отпечатка пирамиды. Определялись количественные характеристики и геометрические параметры возникающих в деформационной области двойников. Диапазон изменения нагрузки P от 5 до 25 Н с шагом 5 Н.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Типичная деформационная картина, возникающая у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) монокристалла Ni_2MnGa , представлена на рис. 1. Отличительной особенностью этой картины является то, что она образована системой параллельных тонких линзовидных двойников, образующих вокруг отпечатка индентора четырехугольник (рис. 1, *а*). Увеличенное изображение отдельной группы двойников представлено на рис. 1, *б*. Видно, что данные двойники бывают криволинейными, что обусловлено, как правило, их взаимодействием с двойниками другой системы двойникования.

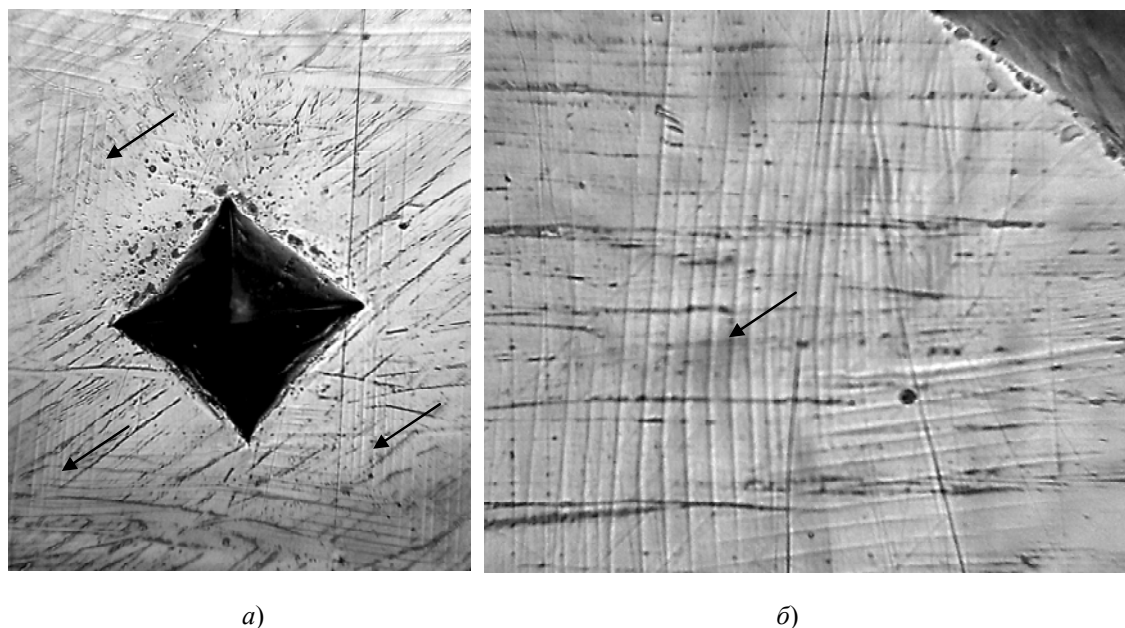


Рис. 1. Деформационная картина у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (100) мартенситной фазы монокристалла Ni_2MnGa : а – отпечаток индентора и система тонких линзовидных двойников вокруг него ($\times 150$); б – увеличенное изображение области у грани пирамиды Виккерса ($\times 300$)

На рис. 2 представлены зависимости числа двойников и их групп от величины нагрузки на индентор Виккерса. На графике видно, что общее количество возникающих вокруг отпечатка двойников N и количество двойников в отдельной группе N_2 линейно возрастает при увеличении нагрузки вплоть до значения в 20 Н. При данном значении нагрузки наблюдается экстремум рассматриваемых параметров, после которого они убывают. Это указывает на наличие у рассматриваемого типа двойникового конкурирующих процессов. Наиболее существенным из таких процессов является скольжение, которое, судя по виду зависимостей $N = f(P)$ и $N_2 = f(P)$, после нагрузки 20 Н существенно активизируется. На активность процессов двойникового и скольжения влияет ориентационный фактор Шмида, который полностью определяется взаимной ориентацией направления деформирования и плоскостей двойникового или скольжения. Вторым фактором, определяющим преимущество двойникового или скольжения, является энергетический фактор, который прямо пропорционален квадрату величины вектора Бюргера дислокаций двойниковых границ или скольжения [5].

Мощность вектора Бюргера частичной двойниковой дислокации ниже, чем полной дислокации конкурирующей системы скольжения. Поэтому на начальном этапе деформирования (при нагрузках на индентор до 20 Н) двойникование более активно. При этом наличие максимума на кривых $N = f(P)$ и $N_2 = f(P)$ указывает, что фактор Шмида для двойникового несколько ниже, чем для скольжения. Поэтому при нагрузках на индентор выше 20 Н, когда энергии деформирования достаточно для активирования скольжения, последнее подавляет двойникование. Увеличение плотности полных дислокаций у отпечатка индентора также подавляет двойникование в результате блокировки источников двойниковых дислокаций напряжениями полных дислокаций скольжения.

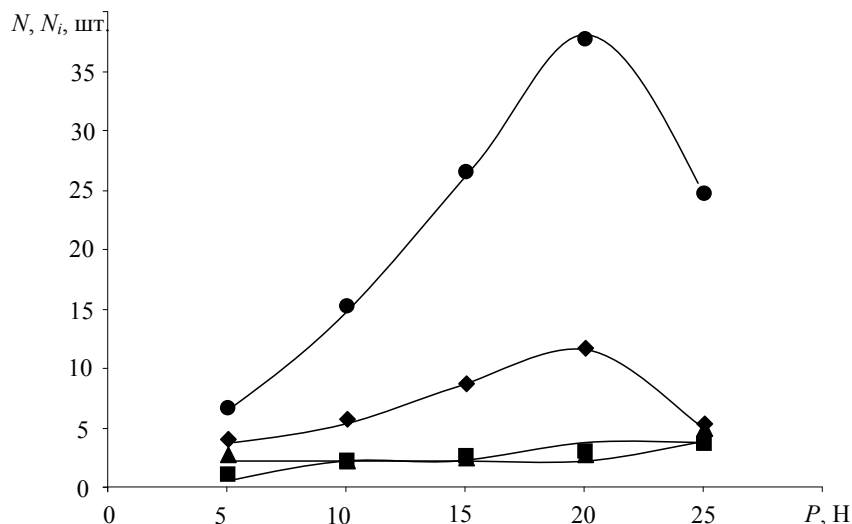


Рис. 2. Зависимость количественных параметров единичных двойников и двойниковых групп от нагрузки P : ● – общее количество двойников N ; ■ – количество групп двойников N_1 ; ◆ – количество двойников в группе N_2 ; ▲ – количество отдельных, не входящих в группу, двойников N_3

Рассмотренные процессы оказывают малое влияние на изменение величин N_1 и N_3 , количество групп двойников и количество отдельностоящих двойников соответственно в зависимости от нагрузки на индентор. Данные параметры с увеличением P медленно возрастают и не имеют ярко выраженных точек экстремума. Это указывает на то, что в исследуемом интервале нагрузок скольжение не оказывает влияние на количество групп двойников и на процессы зарождения единичных двойников вдали от групп параллельных двойников.

На рис. 3 показаны зависимости средней длины всех двойников ($\langle L \rangle$), двойников, образующих группу ($\langle L_1 \rangle$), и отдельного, не входящего в группу двойника ($\langle L_2 \rangle$), от величины нагрузки P на индентор. Представленные зависимости имеют общую тенденцию возрастания при увеличении нагрузки P .

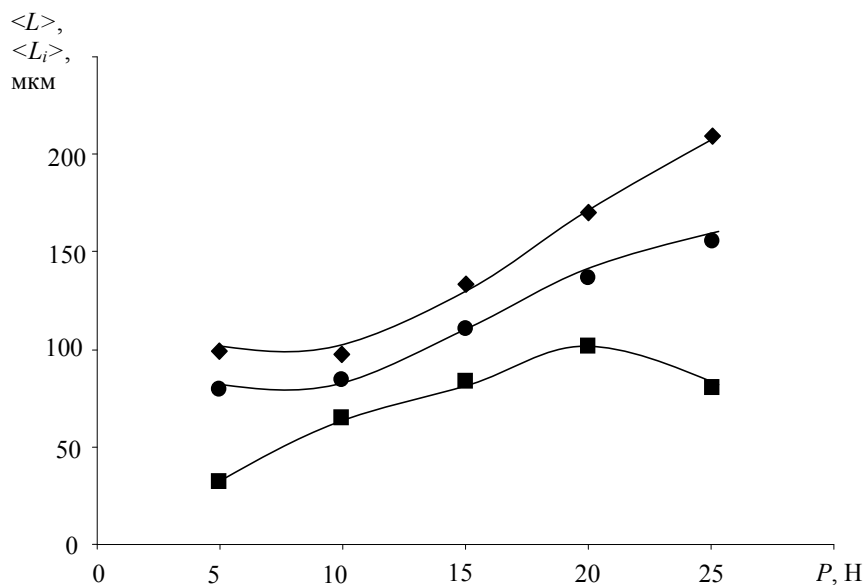


Рис. 3. Зависимость средних длин двойников от нагрузки P : ● – средняя длина всех двойников $\langle L \rangle$; ■ – средняя длина двойников в группе $\langle L_1 \rangle$; ◆ – длина отдельных, не входящих в группу, двойников $\langle L_2 \rangle$

Графики зависимостей $\langle L \rangle = f(P)$ и $\langle L_2 \rangle = f(P)$ в исследуемом интервале нагружения имеют схожий вид: при малых нагрузках на индентор отсутствует рост длины двойников и плавный рост значений $\langle L \rangle$ и $\langle L_2 \rangle$ в области более высоких нагрузок.

Зависимость $\langle L_1 \rangle = f(P)$ имеет иной вид. В этом случае наблюдается плавный рост значений $\langle L_1 \rangle$ при увеличении нагрузки до 20 Н. При данном значении нагрузки наблюдается максимум зависимости $\langle L_1 \rangle = f(P)$, т. е. при дальнейшем увеличении P значения $\langle L_1 \rangle$ убывают.

Анализ полученных зависимостей показывает, что скольжение оказывает малое влияние на пробег двойникующих дислокаций в случае двойников, образующих группы. Более существенно это влияние в случае единичных двойников при нагрузках на индентор свыше 20 Н. Это говорит о том, что группы двойников образуются в областях сопутствующего скольжения, обусловленного оказываемыми малое влияние на торможение двойникующих дислокаций винтовыми дислокациями, в то время как единичные двойники образуются в области скольжения краевых дислокаций, которые выступают барьерами на пути развития двойниковых границ.

Схожесть кривых $\langle L \rangle = f(P)$ и $\langle L_2 \rangle = f(P)$ и отличие их от зависимости $\langle L_1 \rangle = f(P)$ указывает на то, что на общую картину развития двойников в зависимости от нагрузки более существенное влияние оказывают системы из групп двойников, чем единичные, не входящие в группу двойники.

Зависимость $\langle H \rangle = f(P)$ средней ширины линзовидных остаточных двойников от нагрузки на индентор представлена на рис. 4. Ширина двойников определяет количество n сгенерированных источником двойникующих дислокаций, которое определяется по формуле $n = H/a$, где H – ширина двойника; a – межатомное расстояние в плоскости, перпендикулярной плоскости двойникования.

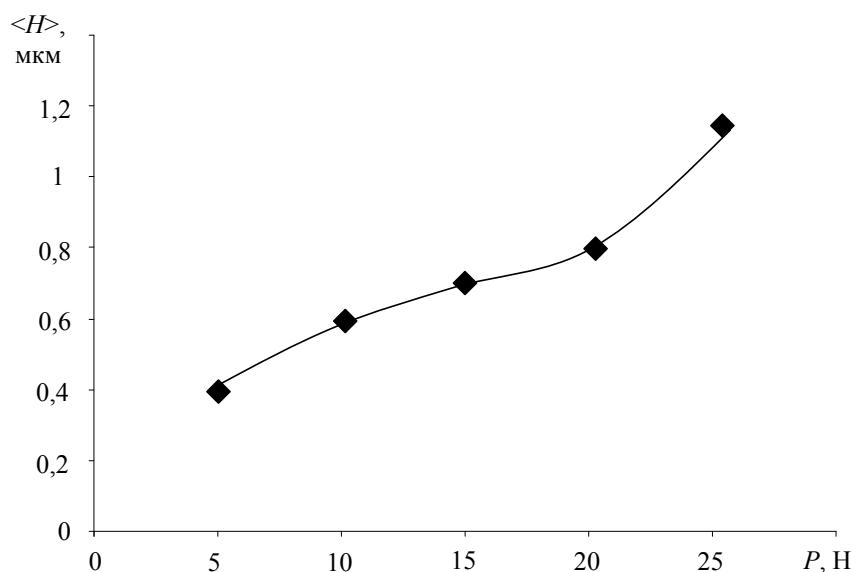


Рис. 4. Зависимость средней ширины всех двойников $\langle H \rangle$ от величины нагрузки на индентор P

Как видно из рис. 4, с ростом нагрузки на индентор растет ширина двойников, а вместе с ней растет и количество двойникующих дислокаций, генерируемых источниками. Скорость роста зависимости $\langle H \rangle = f(P)$ от нагрузки на индентор увеличивается при нагрузках более 20 Н. В то же время при таких же нагрузках на индентор уменьшается число источников двойникующих дислокаций, проявляющееся в уменьшении числа двойников (см. рис. 2). Это указывает на то, что скольжение, блокируя источни-

ки двойникующих дислокаций, создает дополнительные напряжения, активирующие работу активных источников.

Уровень внутренних напряжений, создаваемых двойниковой границей, растет с ростом плотности ρ двойникующих дислокаций на двойниковых границах, которая определяется по формуле

$$\rho = H / aL,$$

где L – длина двойника [5].

С другой стороны, плотность двойникующих дислокаций связана со степенью некогерентности η двойниковой границы следующим соотношением:

$$\rho = \eta / a,$$

т. е. $\eta = H / L$.

Поэтому степень некогерентности двойниковых границ является важным параметром, определяющим уровень внутренних напряжений, которые создает двойниковая граница. Зависимости степени некогерентности границ рассматриваемых двойников от нагрузки на индентор представлены на рис. 5. Видно, что уровень внутренних напряжений, создаваемых групповыми двойниками, почти в два раза ниже, чем единичными двойниками, не входящими в группу.

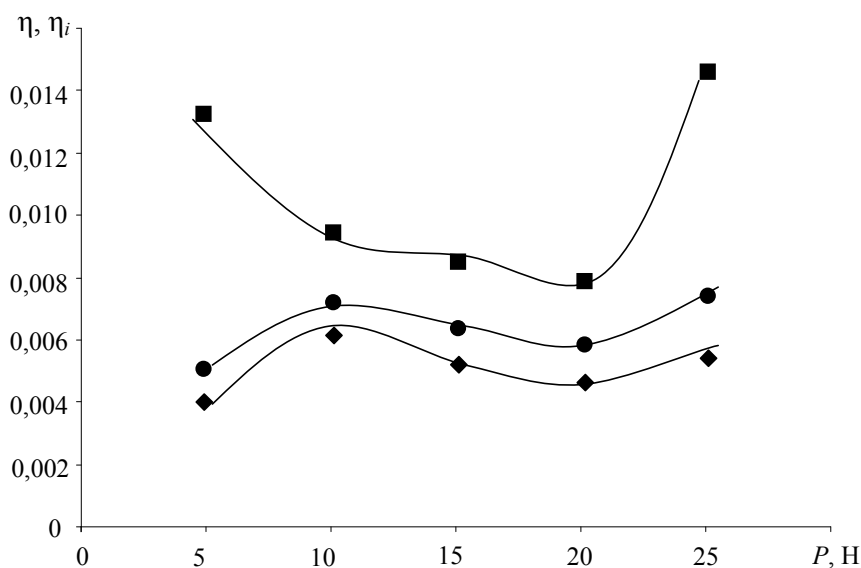


Рис. 5. Зависимость степени некогерентности двойников от нагрузки P : ● – степень некогерентности всех двойников (η); ■ – степень некогерентности двойников в группе (η_1); ◆ – степень некогерентности единичных двойников, не входящих в группы (η_2)

Заключение

Таким образом, с использованием метода индентирования поверхности пирамидой Виккерса и метода оптической микроскопии получены закономерности механического двойникового монокристаллов Ni_2MnGa при локальном деформировании их поверхности (100). Установлено, что с увеличением нагрузки на индентор растет число двойников, возникающих у отпечатка индентора, увеличивается их длина и ширина, растет степень некогерентности двойниковых границ. Обнаружено наличие конкурирующих с двойникованием процессов, которые при нагрузке на индентор более 20 Н блокируют процесс зарождения двойников.

Работа получила поддержку Белорусского Республиканского Фонда фундаментальных исследований (грант Ф13-021 на тему «Механическое двойникование, особенности пластической деформации и механика формоизменения магнитных сплавов Гейслера с памятью формы»).

Авторы благодарят научного руководителя Научно-производственного подразделения «AdaptaMat» (Финляндия, Хельсинки) Созинова А. Л. за любезно предоставленные образцы.

Литература

1. Roth1, S. Magneto-mechanical behaviour of textured Polycrystals of NiMnGa ferromagnetic Shape Memory Alloys / S. Roth1, U. Gaitzsch1, M. Potschke1, L. Schultz1 // *Advanced Materials Research*. – 2008. – Vol. 52. – P. 29–34.
2. 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. – Vol. 49. – P. 129–133.
3. Sozinov, A. Stress- and magnetic-field-induced variant rearrangement in Ni–Mn–Ga single crystals with seven-layered martensitic structure / A. Sozinov [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – Vol. 378. – P. 399–402.
4. Остриков, О. М. Исследование пластической деформации поверхности монокристалла Ni₂MnGa методом индентирования / О. М. Остриков, А. Л. Созинов, А. В. Сорока // *Инженер.-физ. журн.* – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1132–1141.
5. Остриков, О. М. Механика двойникования твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

Получено 27.06.2013 г.