

УДК 539.4

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ДВОЙНИКОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО МОНОКРИСТАЛЛА Ni_2MnGa С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

О.М. Остриков, Е.В. Шматок

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

DEFORMATION TWINNING OF THE FERROMAGNETIC SINGLE CRYSTAL OF Ni_2MnGa WITH THE SHAPE MEMORY EFFECT

O.M. Ostrikov, E.V. Shmatok

P.O. Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Belarus

Изучены особенности формы линзовидных двойников, двойниковых прослоек, а также вторичных клиновидных двойников в монокристалле Ni_2MnGa . Проанализированы механизмы взаимодействия друг с другом двойников различных систем двойникования. Установлено, что на границах и у вершин двойников образуются клиновидные двойники второго порядка. Рассмотрены особенности взаимодействия двойников с различными дефектами кристаллической решетки.

Ключевые слова: двойникование, память формы, магнитные сплавы.

The features of the shape of lenticular twins, twin interlayers, as well as secondary wedge-shaped twins in a single crystal Ni_2MnGa are studied. The mechanisms of exposure to each other twins with different twinning systems are analyzed. It has been established that at the boundaries and vertices of twins the wedge-shaped counterparts of the second order are formed.

Keywords: twinning, shape memory, magnetic alloys.

Введение

Локализованное напряженно-деформированное состояние монокристалла Ni_2MnGa обусловленное макро- и микродефектами структуры различной природы часто приводит к разрушению [1], [2]. Первостепенной, требующей решения задачей при практическом использовании того или иного материала является прогнозирование его служебной долговечности. Разрушение металлов – процесс многостадийный [1], на начальных этапах которого, напряжения от внешней нагрузки компенсируется двойникующимся материалом посредством упругого или остаточного двойникования. В результате множественного взаимодействия двойников друг с другом, а также с иными дефектами, происходит локальная компенсация либо рост внутренних напряжений, посредством которых тормозятся или открываются каналы зарождения трещин [1]. Поэтому исследование процессов механического двойникования деформируемых твердых тел является важной научной и практической задачей [3]–[6].

Перспективность технического применения материала Ni_2MnGa определяется его уникальными физико-механическими свойствами и соответствием требованиям к его усталостно-прочностным характеристикам [7], [8]. В связи с этим исследование особенностей двойникования и разрушения ферромагнитного сплава Ni_2MnGa с эффектом запоминания формы в настоящее время является актуальным.

Целью данной работы стал анализ особенностей уникального двойникового рельефа на

поверхности монокристалла Ni_2MnGa с эффектом памяти формы и механизмов взаимодействия двойников с различными структурными неоднородностями.

1 Методика эксперимента

Монокристаллы ферромагнитного сплава Ni_2MnGa были получены методом Бриджмена. Призматическая форма образцов размером $20 \times 2 \times 2$ мм формировалась при помощи технологии электроискрового резания вдоль заданных кристаллографических плоскостей. Полученные грани призмы обрабатывались полированием [7]. Велась оптическая микроскопия поверхности $\{100\}$ образца деформированного одноосными знакопеременными нагрузками величиной до 2 МПа.

2 Результаты и их обсуждение

На рисунке 2.1 представлены две двойниковые прослойки с участками когерентных и некогерентных границ. В теле двойника 2 (рисунок 2.1, а) имеются несдвойникованные области, показанные стрелками 1 и 2, которые образовались в процессе огибания двойникующими дислокациями препятствия (область 3 на рисунке 2.1, а). Структурная неоднородность в отмеченной на рисунке 2.1, а области 3 является концентратором больших внутренних напряжений, о чем свидетельствует компенсирующее их появление двойников (стрелки 4 на рисунке 2.1, а). Двойники 5 (рисунок 2.1, а) являются тонкими и остаточными, отличающиеся от тонких упругих двойников [9] тем, что не исчезают после снятия нагрузки.

Картина на рисунке 2.1, б) является продолжением рисунка 2.1, а) и отражает некогерентную область двойниковой прослойки, приобретающей клиновидную форму. В данной области границы двойников некогерентны в связи с чем создают большие внутренние напряжения, которые компенсируются группой тонких параллельных двойников (области 6 и 7 на рисунке 2.1, б). Как показано в [1], наибольшие напряжения сосредоточены у вершины двойника, где у двойника 2 на рисунке 2.1, б) наблюдается группа вторичных двойников. Данные напряжения в совокупности с напряжениями от внешней нагрузки привели к образованию клиновидных двойников, отмеченных на рисунке 2.1, б) стрелкой 8.

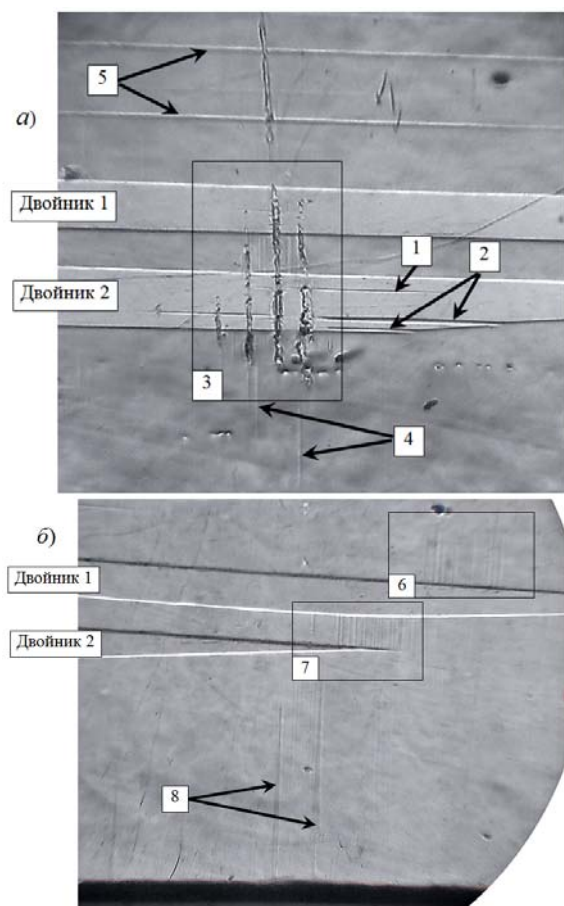


Рисунок 2.1 – Двойниковые прослойки в деформированном монокристалле Ni_2MnGa : а) области двойниковых прослоек с когерентными и слабнекогерентными участками границ; б) клиновидные области двойников с некогерентными границами; стрелки 1 и 2 – несдвоенные области внутри двойниковой прослойки; область 3 – микроструктурные дефекты; 4 – тонкие линзовидные двойники; 5 – тонкие двойниковые прослойки; 6 – тонкие двойники, перпендикулярные когерентной границе двойниковой прослойки; 7 – группа параллельных тонких двойников у клиновидной вершины нетонкого двойника; 8 – клиновидные двойники у поверхности образца ($\times 150$)

На рисунке 2.2 представлен некогерентный участок двойниковой прослойки 1 с углом раствора α . На верхней границе прослойки 1 видна группа вторичных параллельных двойников (область 2). В данной группе наиболее широкий двойник 3 образовался в месте сближения границ двойника 1 в области формирования тонкой части двойника. На тонком участке прослойки 1 видно, что плотность вторичных двойников к вершине двойника уменьшается с уменьшением их длины. Это указывает на то, что тонкий участок у вершины двойника приводит к релаксации внутренних напряжений от некогерентных границ двойника 1.

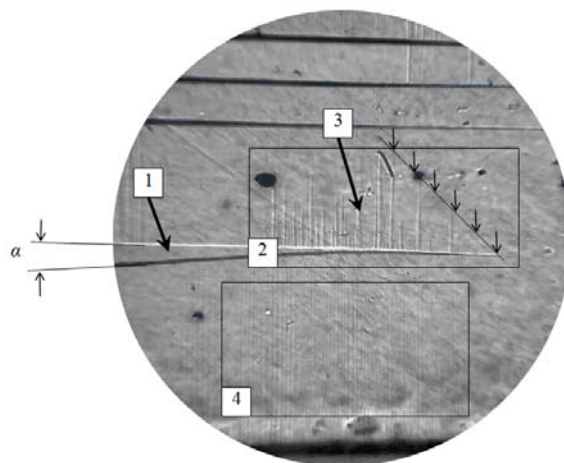


Рисунок 2.2 – Клиновидный участок двойниковой прослойки: 1 – двойник; 2 – группа параллельных двойников; 3 – двойник, имеющий в группе наибольшую ширину; 4 – система полос скольжения, соединяющих двойник 1 и поверхность ($\times 150$)

Нижняя граница данной прослойки 1 на рисунке 2.2 имеет вогнутую форму [2]. Под этой границей видны параллельные полосы скольжения (область 4 на рисунке 2.2), исходящие от поверхности кристалла. Плотность полос скольжения максимальна у искривленного участка границы двойниковой прослойки и уменьшается при продвижении к вершине прослойки 1. Это указывает на то, что напряжения от искривленной некогерентной границы двойника 1 убывают по мере следования к его вершине.

В результате движения границы раздела фаз аустенит-мартенсит посредством одноосного сжатия монокристалла Ni_2MnGa в плоскости типа $\{010\}$ образовалась аустенитная прослойка 1 (рисунок 2.3), заключенная в мартенситной фазе. Границы прослойки в некоторых областях имеют слабовыраженные неровности, имеющие правильную зубчатую форму, что указывает на существовавшие ранее в этих областях двойниковые прослойки, расположенные в плоскостях, перпендикулярных границе раздела аустенит-мартенсит.

На исследуемой поверхности (001) также имеются следы взаимодействия существовавших ранее двойников двух типов (стрелки 2 на рисунке 2.3), плоскости двойникования разориентированных друг по отношению к другу на малый угол порядка 6° [7]. Взаимодействие таких двойников часто приводит к образованию каналов Розе и трещин [7].

Препятствие 3 на рисунке 2.3 не огибается прослойкой и не формирует несдвоенные области, как в случаях инородных включений [10], следовательно, можно предположить, что это сопряженные с выкрашиванием пластические зоны.

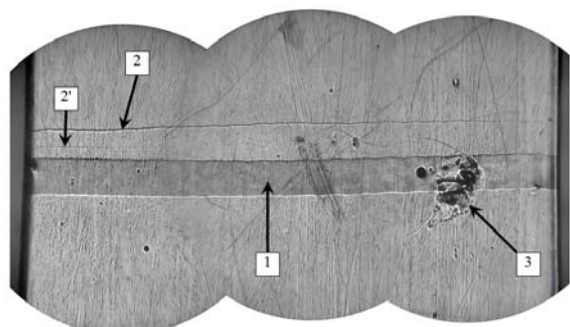


Рисунок 2.3 – Аустенитная прослойка (отмечена стрелкой 1) в мартенситной фазе монокристалла Ni_2MnGa ; 2 – следы взаимодействия существовавших ранее двойников двух типов; 3 – область неоднородности структуры монокристалла ($\times 150$)

На рисунке 2.4 показана аустенитная прослойка 1 с неровными границами и видимыми в мартенситной фазе 2 перпендикулярными границам прослойки 1 двойниками 3. Следует отметить, что двойники 3 на рисунке 2.4 наблюдаются только в мартенситной фазе.

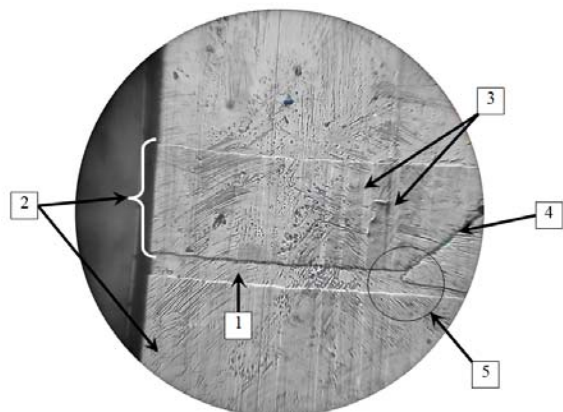


Рисунок 2.4 – Двойникование мартенситной фазы монокристалла Ni_2MnGa : 1 – аустенитная прослойка; 2 – мартенситная фаза; 3 – двойники в мартенситной фазе; 4 – фрагмент трещины; 5 – область взаимодействия трещины с аустенитной прослойкой ($\times 150$)

Взаимодействие аустенитной прослойки 1 с вершиной трещины 4 (рисунок 2.4) спровоцировало появление участка, в котором не прошли бездиффузионные превращения мартенсита в аустенит (область 5), что указывает блокирование трещиной бездиффузионных фазовых превращений.

На рисунке 2.5 представлен случай объемного разрушения монокристалла. Интересно заметить наличие мартенситной прослойки 1, имеющей в своем объеме двойники 2, перпендикулярные границе раздела аустенит-мартенсит и придающие этой границе периодичный рельеф. Данная мартенситная прослойка «прижата» к трещине 3 внешними напряжениями. В области 3' на рисунке 2.5 представлен переход трещины в другую плоскость с сопутствующим выкрашиванием и формированием полос аккомодации 4, а также образованием микротрещины 5–5', параллельной трещине 3–3' (см. рисунок 2.5). В областях 6 видны следы пластической деформации в виде нескольких групп параллельных полос сдвига, разделенных областями без следов пластической деформации. Это указывает на то, что полосы 6 образовались в параллельных двойниковых прослойках, исчезнувших после приложенной нагрузки обратного знака.

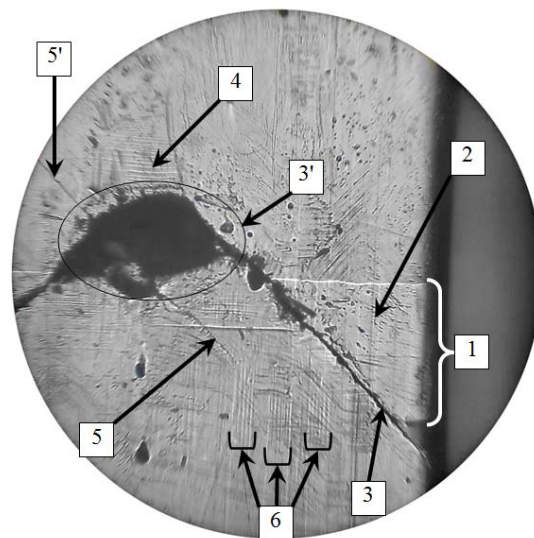


Рисунок 2.5 – Макроскопическая трещина в системе следов пластической деформации в монокристалле Ni_2MnGa : 1 – мартенситная прослойка; 2 – двойник в мартенситной прослойке; 3–3' – трещина с областью ее перехода в другую плоскость при интенсивном выкрашивании; 4 – полосы аккомодации; 5–5' – микротрещина; 6 – полосы сдвига параллельных двойниковых прослойках ($\times 150$)

Группы двойниковых прослоек с когерентными и некогерентными границами изображены на рисунке 2.6. Типичная для этого случая двойниковая прослойка 1 имеет когерентные

прямолинейные участки границ и искривленные некогерентные участки. Следует отметить наличие в представленной на рисунке 2.6 области тонких линзовидных двойников 2, перпендикулярных границам двойников типа 1. В двойниках данного типа линзовидные двойники отсутствуют, что указывает на аустенитную природу двойников типа 1. Данные двойники, как видно из рисунка 2.6, препятствуют развитию двойников типа 2, длина которых определяется величиной пространства между аустенитными прослойками.

На рисунке 2.6 также представлены тонкие двойники типа 3, которые незначительно влияют на длину двойников типа 2 и пересекают их под углом 90° .

В позиции 4 на рисунке 2.6 виден отпечаток алмазной пирамиды Вика, который в области 5 взаимодействует с окрестными двойниками. Видно, что двойники удалены от отпечатка индентора. Это указывает на существование поля остаточных напряжений и структурных изменений, вызванных пластической деформацией при индентировании.

Кратер 6 на рисунке 2.6 стопором для развития двойника 7 не явился. Об этом свидетельствует наличие двух вершин линзовидного двойника 7 по обе стороны кратера. Однако заметно влияние кратера 6 на ширину двойника 7, что указывает на концентрацию напряжений у кратера и активизацию под их действием процесса генерации двойникообразующих дислокаций.

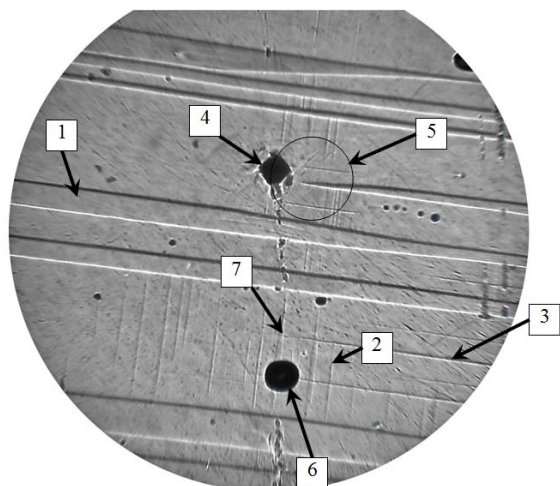


Рисунок 2.6 – Группы двойниковых прослоек с когерентными и некогерентными границами в монокристалле Ni_2MnGa : 1 – двойниковая прослойка с участками когерентных и слабо некогерентных границ; 2 – тонкие линзовидные двойники, перпендикулярные границам двойниковых прослоек типа 1; 3 – тонкий остаточный двойник; 4 – отпечаток пирамиды Вика; 5 – фрагмент картины взаимодействия двойников с полем остаточных напряжений вокруг отпечатка индентора 4; 6 – кратер; 7 – линзовидный двойник, проходящий через кратер ($\times 150$)

На рисунке 2.7 показан торец образца и «прижатые» к нему тонкие параллельные двойниковые прослойки типа 1. Следует отметить, что чем ближе к краю образца, тем меньше ширина и выраженность двойниковых прослоек этого типа. Наблюдаемая на рисунке 2.7 трещина 2 – след взаимодействия описанных в [7] двойников двух типов в плоскостях двойникования, ориентированных друг к другу под малым углом. Наблюдаются также продольные полосы типа 3, являющиеся системой границ двойниковых прослоек, перпендикулярных границам поперечных прослоек типа 1. Из рисунка 2.7 видно, что двойниковые прослойки 1 испытывают сопротивление при выходе на торцевую поверхность. Это означает, что подвижность двойниковых границ у торцевых поверхностей образца ниже, чем в средней его части.

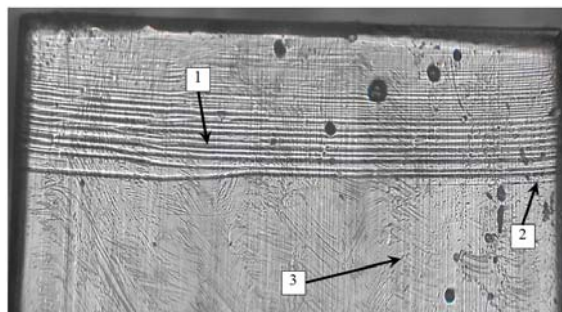


Рисунок 2.7 – Торец монокристаллического призматического образца Ni_2MnGa : 1 – система тонких параллельных двойников; 2 – микротрещина; 3 – система параллельных границ двойников, перпендикулярных границам двойников типа 1 ($\times 10$)

Картина взаимодействия тонких двойников с перпендикулярными в плоскости $\{100\}$ следами плоскостей двойникования представлена на рисунке 2.8. Двойники 1 и 2 тонкие и имеют разную малую ширину. В области взаимодействия тонкого двойника 1 и перпендикулярного ему двойника типа 3 наблюдается искривление границ двойника 1 отмеченные стрелками 4. Это указывает на то, что двойник 1 не является непреодолимым препятствием для двойника 3 и данные двойники являются деформационными двойниками мартенситной фазы монокристалла Ni_2MnGa .

Рисунок 2.9 отображает деформационную картину, возникшую у поверхности 1 образца. Данный рисунок является продолжением рисунка 2.8. Двойники 2 и 3 на рисунке 2.9 являются частями двойников 1 и 2 на рисунке 2.8. Как видно из сравнения рисунков 2.8 и 2.9, тонких линзовидных двойников больше в области, представленной на рисунке 2.9, что указывает на наличие в этой области внутренних напряжений более высокого уровня, чем в области на рисунке 2.8. Наибольшее количество тонких линзовидных

двойников наблюдается в области неоднородности 5 (рисунок 2.9), где ширина двойников типа 6 наибольшая. Это обусловлено тем, что неоднородности в деформируемом твердом теле являются концентраторами больших внутренних напряжений [11], которые в зависимости от знака могут не только активировать процесс двойникования, но и приводить к частичному раздвойникованию, как в случае двойников 7 (рисунок 2.9).

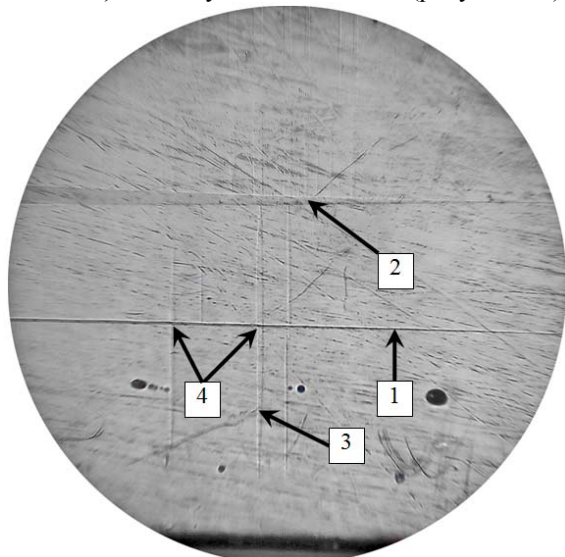


Рисунок 2.8 – Картина взаимодействия тонких двойников, следы плоскостей двойникования которых перпендикулярны друг другу:

- 1 – тонкий двойник; 2 – тонкий двойник клиновидной формы; 3 – линзовидный двойник в плоскости двойникования, след которой в плоскости {100} перпендикулярен следу плоскости двойникования двойника 1;
- 4 – области искривления тонкого двойника 1 в результате взаимодействия с двойниками типа 3 (×150)

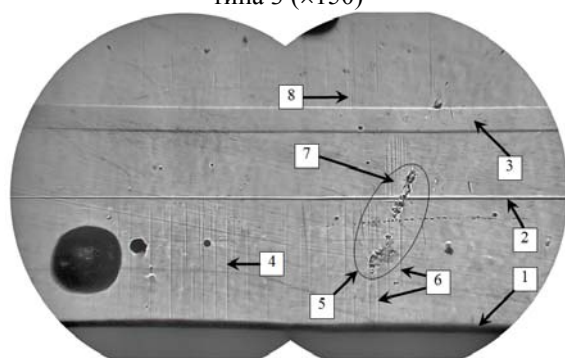


Рисунок 2.9 – Деформационная картина у поверхности образца: 1 – поверхность; 2 – тонкий двойник; 3 – двойниковая прослойка; 4 – тонкие линзовидные двойники, перпендикулярные двойникам 2 и 3; 5 – локальная неоднородность; 6 – линзовидные двойники с наибольшей шириной; 7 – двойники, подвергнутые частичному раздвойникованию; 8 – двойник с вершиной, получившей расслоение в результате взаимодействия с двойником 3 (×150)

На рисунке 2.9 интересно также отметить наличие двойника 8, взаимодействующего с двойником 3. В результате такого взаимодействия вершина двойника 8 получила расслоение в результате образования несдвойникованных областей.

Заключение

Таким образом, при помощи метода оптической микроскопии изучены особенности картины компенсации деформирующих воздействий. Обнаружена возможность образования клиновидных двойников в перпендикулярных плоскостях двойникования.

Авторы благодарят научного руководителя «AdaptaMat Ltd.» (Финляндия, Хельсинки) А.Л. Созинова за любезно предоставленные образцы Ni_2MnGa .

ЛИТЕРАТУРА

1. Финкель, В.М. Разрушение кристаллов при механическом двойниковании / В.М. Финкель, В.А. Федоров, А.П. Королев. – Ростов-на-Дону. – 1990. – 172 с.
2. 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.
3. Остриков, О.М. Особенности механического двойникования, локального разрушения и формирования каналов Розе в монокристаллах Ni_2MnGa при индентировании их поверхности пирамидой Виккерса / О.М. Остриков, Е.В. Шматок // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 5–10.
4. Остриков, О.М. Закономерности механического двойникования мартенситной фазы монокристалла Ni_2MnGa при деформировании его поверхности пирамидой Виккерса / О.М. Остриков, Е.В. Шматок // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2013. – № 3 (54). – С. 37–42.
5. Остриков, О.М. Особенности механического двойникования и локального разрушения монокристаллического сплава Ni_2MnGa при индентировании его поверхности / О.М. Остриков, Е.В. Шматок // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, № 4 (часть 2). – С. 1924–1925.
6. Остриков, О.М. Четырехфункциональный метод расчета напряженно-деформированного состояния в системе параллельных остаточных линзовидных деформационных двойников в мартенситной фазе Ni_2MnGa / О.М. Остриков, Е.В. Шматок // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2013. – № 12. – С. 95–100.
7. Giant magnetic-field-induced strain in $NiMnGa$ seven-layered martensitic phase / A. Sozinov [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80. – P. 1746–1748.

8. *Остриков, О.М.* Исследование пластической деформации поверхности монокристалла Ni_2MnGa методом индентирования / О.М. Остриков, А.Л. Созинов, А.В. Сорока // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1132–1141.

9. *Косевич, А.М.* Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А.М. Косевич, В.С. Бойко // Успехи физических наук. – 1971. – Т. 104, № 2. – С. 101–255.

10. *Остриков, О.М.* Особенности двойникования монокристаллов висмута, облученных ионами тантала / О.М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 89, № 6. – С. 99–103.

11. *Работнов, Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.

Поступила в редакцию 16.06.14.