

**МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ  
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНЗОВИДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВОЙНИКОВ,  
ВОЗНИКАЮЩИХ В МАРТЕНСИТНОЙ ФАЗЕ  
МАГНИТНОГО СПЛАВА  $Ni_2MnGa$ , ОБЛАДАЮЩЕГО СВОЙСТВОМ  
ЗАПОМИНАНИЯ ФОРМЫ**

*Инж. ШМАТОК Е. В., канд. физ.-мат. наук, доц. ОСТРИКОВ О. М.*

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого*

В настоящее время математическое моделирование особенностей напряженно-деформированного состояния является перспективным направлением научных исследований. В связи с этим целью данной работы стал расчет напряженно-деформированного состояния, обусловленного системой параллельных линзовидных остаточных механических двойников, возникающих при локальном деформировании поверхности мартенситной фазы монокристалла  $Ni_2MnGa$ . Метод применяется с использованием принципа суперпозиции полей и в приближении непрерывного распределения двойникующих дислокаций на границах двойника в сплошной упругой среде.

Получены графики распределения полей смещений и напряжений, на основании которых замечено, что конфигурация распределения компоненты смещений  $u_y$  значительно отличается от смещений компонент  $u_x$  и  $u_z$ , имеющих подобное друг другу распределение смещений. Наибольшая величина смещений наблюдается у компоненты  $u_y$  в области вершин двойников.

Представлены результаты расчетов шести компонент тензора полей напряжений. Отмечено подобие характера распределения напряжений компонент  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{zz}$ , однако численно компоненты отличны друг от друга примерно в два раза. Наибольшая величина возникающих напряжений в системе линзовидных двойников наблюдается у компонент  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{yz}$  и сосредоточена главным образом у границ и вершин двойников. Общей чертой полученных компонент смещений и напряжений системы линзовидных двойников является симметричность относительно  $OY$ . Помимо этого, распределение напряжений у всех полученных компонент тензора главным образом локализовано на границах

и у вершин двойников, где, как правило, сосредоточены наибольшие значения напряжений, способных оказывать существенное влияние на дислокационные и диффузионные процессы.

**Ключевые слова:** сплавы Гейслера, параллельные линзовидные остаточные механические двойники, локальное деформирование, поверхность мартенситной фазы монокристалла, принцип суперпозиции полей, двойнивающие дислокации, поля напряжений.

Ил. 4. Библиогр.: 13 назв.

## METHOD FOR CALCULATION OF DISPLACEMENT FIELDS AND STRESSES IN SYSTEM OF PARALLEL LENTICULAR MECHANICAL TWINS OCCURRING IN MARTENSITIC PHASE OF $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ -MAGNETIC ALLOY HAVING PROPERTY OF SHAPE MEMORY

*SHMATOK E. V., OSTRIKOV O. M.*

*P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel*

Nowadays mathematical modeling of peculiar features of a stress-strain state is considered as a perspective direction of research. In this regard the aim of this paper has been to make calculations of the stress-strain state initiated by a system of parallel lenticular residual mechanical twins that occur due to local surface deformation of  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  single crystal martensitic phase. The method is applied while using a superposition principle of fields and approximation of a continuous distribution of twinning dislocations on twin boundaries in a continuous elastic medium.

The calculations have made it possible to obtain distribution graphs of displacement fields and stresses and point out the fact that a configuration of displacement component distribution  $u_y$  is significantly different from the displacement of components  $u_x$  and  $u_z$  having a displacement distribution similar to each other. The highest value of displacement occurs in the component  $u_y$  in twins peaks.

The paper also presents results of calculations for six components of a stress field the tensor. The obtained results have revealed similarity in stress distribution character of the components  $\sigma_{xz}$  and  $\sigma_{zz}$ , but they differ numerically from each other about in two times. The largest value of the stresses occurring in the lenticular twins has been observed in components  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{yz}$  and it has been focused mainly at the borders and peaks of twins. A common feature of the obtained components of displacement and stresses in a lenticular twins system is symmetry with regard to  $OY$ . In addition, the stress distribution of all obtained tensor components has been mainly localized at the borders and at the tops of twins where the highest values of stresses capable of exerting a significant impact on dislocation and diffusion processes are generally concentrated.

**Keywords:** Heusler alloy, parallel lenticular residual mechanical twins, local deformation, surface of single crystal martensitic phase, superposition principle of fields, twinning dislocation, stress field.

Fig. 4. Ref.: 13 titles.

**Введение.** Сплавы Гейслера, или магнитные материалы с памятью формы, приобретают все большую популярность как в практическом, так и в фундаментальном направлении исследований [1–5]. Открытый эффект бездиффузионного фазового превращения в магнитном поле у сплавов Гейслера породил целую волну разнообразных полезных изобретений и механизмов. Самый яркий пример этого – актюатор, в котором способности сплава  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  нашли практическое применение одними из первых [5]. В плане практического применения металлы с памятью формы обладают как достоинствами, так и недостатками. Знание этих качеств позволяет находить наилучшие способы массового и единичного применения, оптимизировать условия эксплуатации и улучшать рабочие характеристики материала.

Экспериментальные исследования двойникования и бездиффузионного фазового превращения в настоящее время проведены на достаточно высоком уровне [6–9]. При этом были установлены базовые принципы поведения мартенситной фазы в магнитных полях с изменяющимися параметрами. Определены общие свойства для всех мартенситных фаз сплава  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ . Показано, что процесс бездиффузионного фазового превращения зависит от направления степени намагниченности мартенситной фазы. При непрерывном вращении магнитного поля в сплаве возникает сильная магнитомеханическая связь, результатом которой становятся магнитоиндуцированные напряжения.

Механическое двойникование мартенситной фазы монокристаллического  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  исследу-

довалось в [9], где для этих целей использовался хорошо зарекомендовавший себя при определении механического двойникования метод локального дозированного деформирования поверхности [10]. Перспективным направлением исследований представляется математическое моделирование особенностей напряженно-деформированного состояния, обусловленного механическим двойникованием  $Ni_2MnGa$ .

Целью данной работы стало моделирование напряженно-деформированного состояния в сплаве  $Ni_2MnGa$ , обусловленного системой параллельных линзовидных двойников, возникающих в  $Ni_2MnGa$  при индентировании его поверхности алмазной пирамидой Виккерса.

Для достижения этой цели, как в [10–12], целесообразно использовать принцип суперпозиции смещений и компонент тензора напряжений, создаваемых совокупностью дислокаций, выстроенных по определенному закону на двойниковых границах.

**Модель.** Типичная деформационная картина, возникающая на поверхности (100) мартенситной фазы  $Ni_2MnGa$  у отпечатка пирамиды Виккерса, представлена на рис. 1.

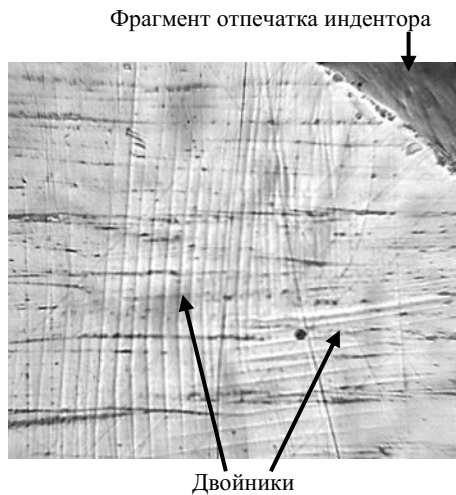


Рис. 1. Деформационная картина, возникающая на поверхности (100) монокристалла  $Ni_2MnGa$ , деформируемой алмазной пирамидой Виккерса (оптическая микроскопия  $\times 150$ )

Главной особенностью этой картины является наличие групп параллельных двойников линзовидной формы, которые, как правило, возникают вдали от отпечатка индентора [9]. Схематическое изображение системы параллельных линзовидных двойников, использо-

ванное в расчетной модели, представлено на рис. 2.

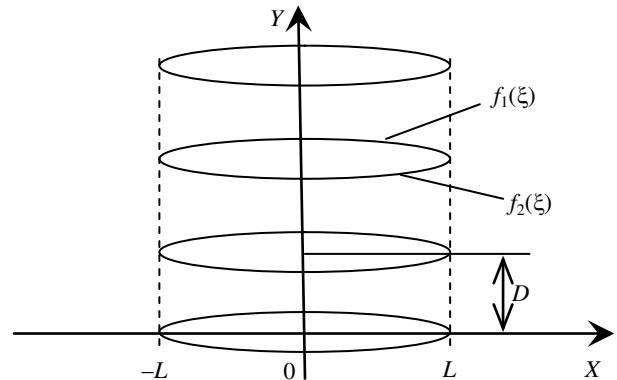


Рис. 2. Система параллельных линзовидных двойников

В приближении непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах, использованного в [10–12], смещения  $u_i$  и напряжения  $\sigma_{ij}$  у такой системы двойников можно рассчитать:

$$u_i(x, y) = u_i^{(1)}(x, y) + u_i^{(2)}(x, y);$$

$$\sigma_{ij}(x, y) = \sigma_{ij}^{(1)}(x, y) + \sigma_{ij}^{(2)}(x, y),$$

где  $i, j$  принимают значения  $x, y$  или  $z$ ;  $u_i^{(1)}(x, y)$ ,  $u_i^{(2)}(x, y)$  и  $\sigma_{ij}^{(1)}(x, y)$ ,  $\sigma_{ij}^{(2)}(x, y)$  – смещения и напряжения, обусловленные первой и второй границами двойника, которые в соответствии с [10] определяются по формулам:

$$u_i^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 - (f_1'(\xi))^2} \cdot \epsilon_{ij} u_i^{(1,0)}(\xi) \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$u_i^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 - (f_2'(\xi))^2} \cdot \epsilon_{ij} u_i^{(2,0)}(\xi) \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 - (f_1'(\xi))^2} \cdot \epsilon_{ij} \sigma_{ij}^{(1,0)}(\xi) \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$\sigma_{ij}^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 - (f_2'(\xi))^2} \cdot \epsilon_{ij} \sigma_{ij}^{(2,0)}(\xi) \times (x, y - nD, \xi) d\xi.$$

Здесь  $M$  – число двойников в системе параллельных двойников;  $f_1(\xi)$  и  $f_2(\xi)$  – функции, определяющие форму двойниковых границ (рис. 2);  $\rho_1(\xi)$  и  $\rho_2(\xi)$  – плотности двойни-  
кующих дислокаций на двойниковых границах;  $\xi$  – параметр интегрирования;  $n$  – индекс сум-

мирования;  $u_i^{(1,0)}(x, y - nD, \xi)$ ,  $u_i^{(2,0)}(x, y - nD, \xi)$  и  $\sigma_{ij}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi)$ ,  $\sigma_{ij}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi)$  – смещения и напряжения, обусловленные единичной двойни-  
кующей дислокацией, находящейся на первой или второй границе двойника, и определяемые по формулам [10]:

$$u_x^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_{\text{кр}}}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{x - \xi} + \frac{(x - \xi)(y - f_1(\xi) - nD)}{2(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_y^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{b_{\text{кр}}}{2\pi} \left[ \frac{1 - 2\nu}{2\pi} \ln((x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2) + \frac{(x - \xi)^2 - (y - f_1(\xi) - nD)^2}{4(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_z^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_{\text{в}}}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{x - \xi};$$

$$\sigma_{xx}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1 - \nu)} \frac{(y - f_1(\xi) - nD)[3(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{yy}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1 - \nu)} \frac{(y - f_1(\xi) - nD)[(x - \xi)^2 - (y - f_1(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{xy}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1 - \nu)} \frac{(x - \xi)[(x - \xi)^2 - (y - f_1(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2]^2};$$

$$\sigma_{zz}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{\text{кр}} \nu}{\pi(1 - \nu)} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zx}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{y - f_1(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zy}^{(1,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi) - nD)^2};$$

$$u_x^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_{\text{кр}}}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{x - \xi} + \frac{(x - \xi)(y - f_2(\xi) - nD)}{2(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_y^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{b_{\text{кр}}}{2\pi} \left[ \frac{1 - 2\nu}{2\pi} \ln((x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2) + \frac{(x - \xi)^2 - (y - f_2(\xi) - nD)^2}{4(1 - \nu)((x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2)} \right];$$

$$u_z^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{b_{\text{в}}}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{x - \xi};$$

$$\sigma_{xx}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{кр}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_2(\xi) - nD)[3(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]^2},$$

$$\sigma_{yy}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{кр}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_2(\xi) - nD)[(x - \xi)^2 - (y - f_2(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]^2},$$

$$\sigma_{xy}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{кр}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(x - \xi)[(x - \xi)^2 - (y - f_2(\xi) - nD)^2]}{[(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2]^2},$$

$$\sigma_{zz}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{кр} \nu}{\pi(1-\nu)} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zx}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = -\frac{\mu b_{в}}{2\pi} \frac{y - f_2(\xi) - nD}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2};$$

$$\sigma_{zy}^{(2,0)}(x, y - nD, \xi) = \frac{\mu b_{в}}{2\pi} \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi) - nD)^2},$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $b_{кр}$ ,  $b_{в}$  – модули соответственно краевой и винтовой составляющих частичной двойнивающей дислокации.

**Результаты расчетов и их обсуждение.**

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4. Для  $Ni_2MnGa$  принимались следующие данные:

$L = 60$  мкм;  $H = 20$  мкм;  $D = 45$  мкм;  $M = 5$ ;  $\rho_1(\xi) = \rho_2(\xi) = \text{const} = \rho = 10^6$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $\mu = 19,231$  ГПа;  $b_{кр} = 2,91 \text{ \AA}$ ;  $b_{в} = 2,74 \text{ \AA}$  [1–6].

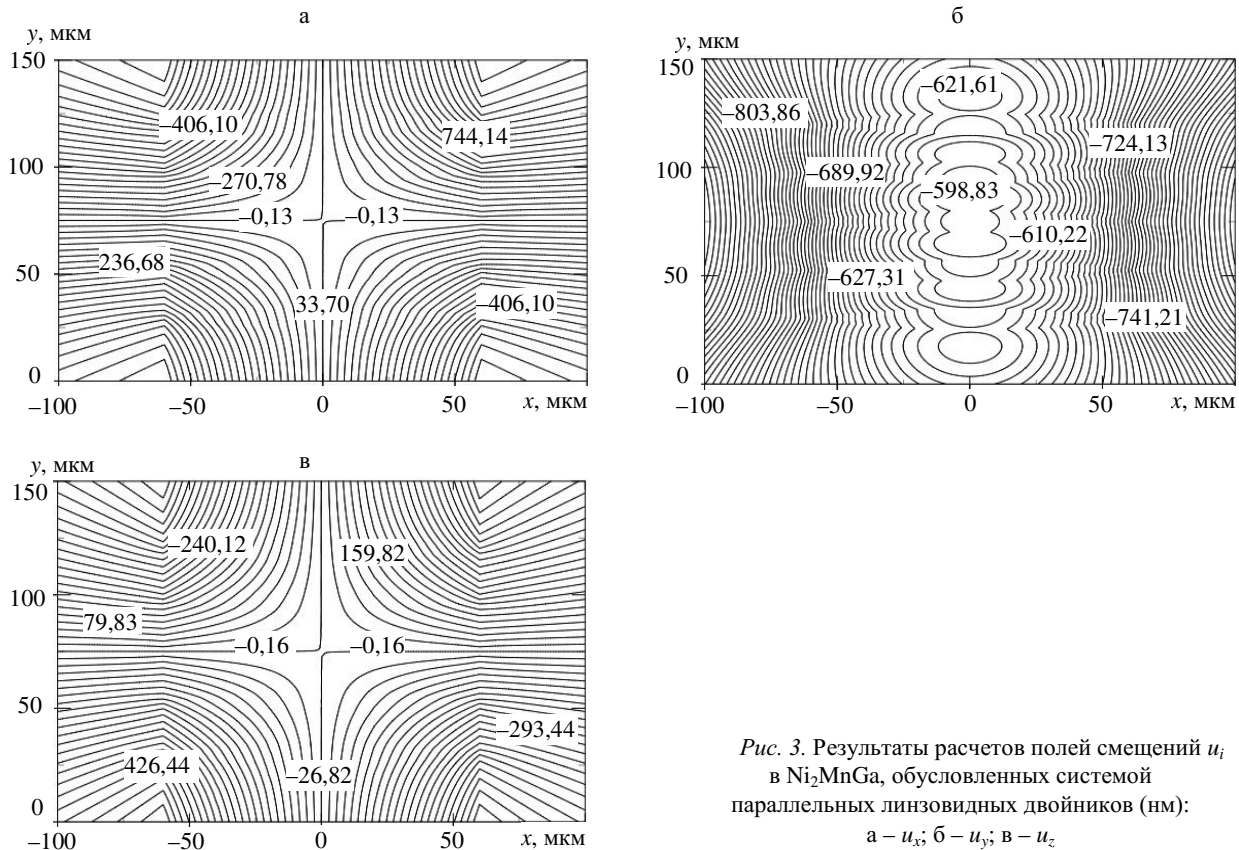


Рис. 3. Результаты расчетов полей смещений  $u_i$  в  $Ni_2MnGa$ , обусловленных системой параллельных линзовидных двойников (нм): а –  $u_x$ ; б –  $u_y$ ; в –  $u_z$

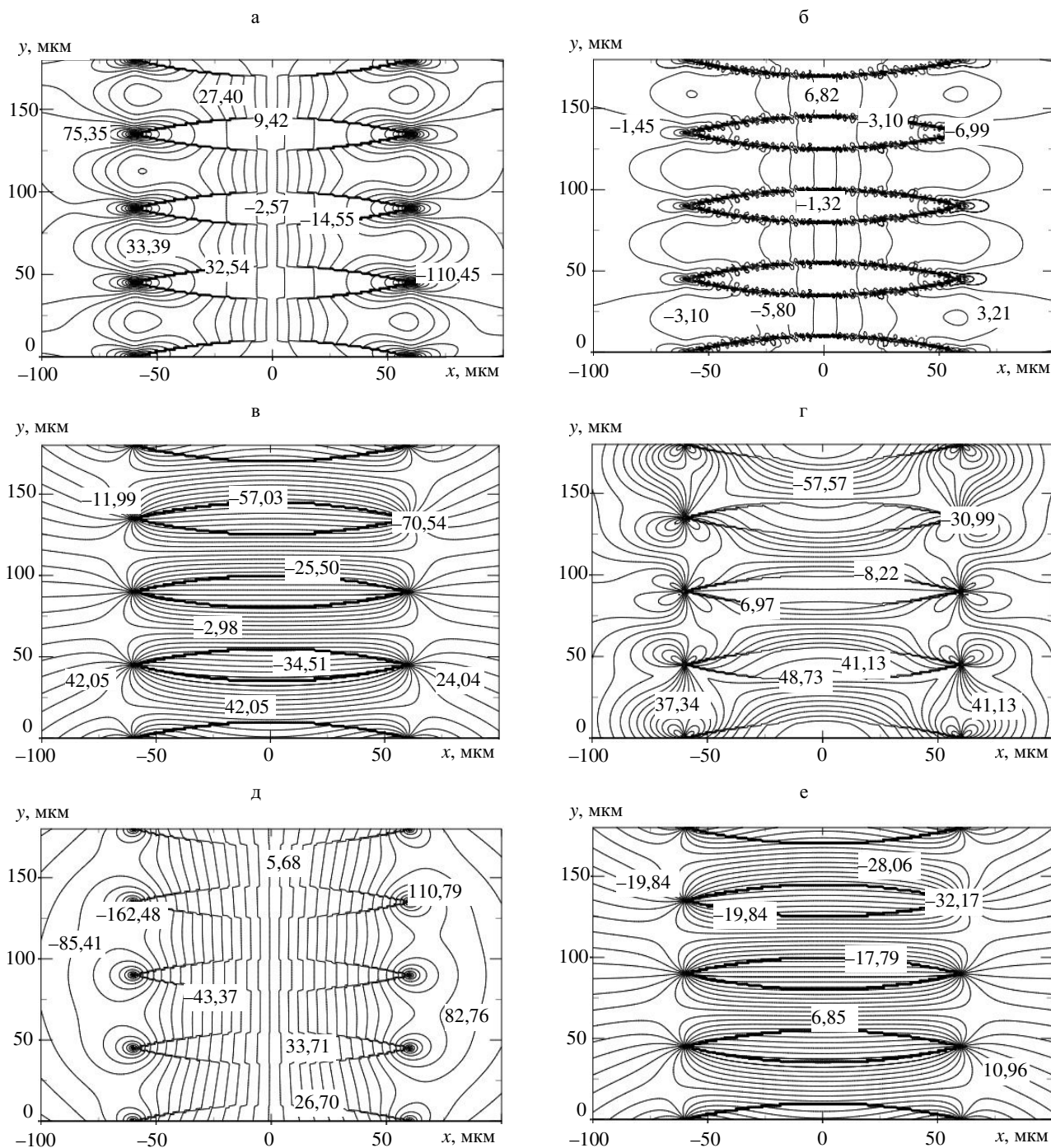


Рис. 4. Поля напряжений  $\sigma_{ij}$  в  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , созданные параллельными линзовидными двойниками (МПа):  
 а –  $\sigma_{xx}$ ; б –  $\sigma_{xy}$ ; в –  $\sigma_{xz}$ ; г –  $\sigma_{yy}$ ; д –  $\sigma_{yz}$ ; е –  $\sigma_{zz}$

Расчет смещений  $u_i$  представлен на рис. 3. Конфигурация линий равных величин смещений для  $u_x$  и  $u_z$  идентична (рис. 3а, в). Отличие заключается в величине численных значений смещений в заданной точке. Данные смещения симметричны относительно начала декартовой системы координат.

Конфигурация полей смещений  $u_y$  (рис. 3б) существенно отличается от конфигурации смещений  $u_x$  и  $u_z$ . Наибольшие смещения  $u_y$  наблюдаются в области вершин двойников.

На рис. 4а представлен результат расчета нормальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_{xx}$ . Максимальные по модулю значения

напряжений  $\sigma_{xx}$  наблюдаются у вершин двойников. Это обусловлено особенностями конфигурации напряжений у единичной двойнивающей дислокации. На верхней и нижней границах двойников значения напряжений значительно ниже, чем у вершин. Метод позволяет рассчитывать напряжения и внутри двойника, где  $\sigma_{xx}$  имеет распределение, симметричное осям  $OX$  и  $OY$ . На рис. 4а также можно наблюдать порядок значений напряжений в пространстве между двойниками. Уровень напряжений в окружающем двойник материале возрастает по мере продвижения вдоль оси  $OX$  к началу координат.

На рис. 4б изображен графический результат расчета сдвиговой компоненты тензора напряжений  $\sigma_{xy}$ . В данном случае наблюдается несколько иная картина. Общий уровень напряжений вначале возрастает по мере удаления вдоль оси  $OX$  от начала координат, а затем монотонно убывает.

Результат расчета сдвиговой компоненты  $\sigma_{xz}$  представлен на рис. 4в. В данном случае линии равных напряжений из бесконечности сходятся к вершинам двойников. У верхних и нижних границ двойников видна существенная разница по модулю значений напряжений. Напряжения у верхних границ приблизительно на порядок выше напряжений у нижних границ линзовидных двойников. Более того, напряжения возрастают по мере продвижения вдоль оси  $OY$  от крайних двойников к двойникам, находящимся в центре системы параллельных двойников.

На рис. 4г представлен результат расчета нормальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_{yy}$ . Как видно, напряжения  $\sigma_{yy}$  на оси  $OY$  по модулю минимальны в центральной части системы параллельных линзовидных двойников, а максимальны у крайних двойников.

Расчет сдвиговой компоненты  $\sigma_{yz}$  тензора напряжений показан на рис. 4д. Конфигурация данных напряжений обладает симметрией относительно оси  $OY$ . Вдоль оси  $OX$  данные напряжения по модулю возрастают при

перемещении от центра единичного двойника в системе параллельных двойников к его вершинам.

Результат расчета нормальной компоненты  $\sigma_{zz}$  тензора напряжений, созданных рассматриваемой системой двойников, отображает рис. 4е. Конфигурация данных напряжений обладает схожестью с результатом, представленным на рис. 4е в случае компоненты  $\sigma_{xz}$ . Отличие заключается лишь в численных значениях.

Общей особенностью для распределения всех компонент тензора напряжений (рис. 4) является локализация напряжений на границах и у вершин двойников. В этих областях уровень напряжений, как правило, имеет наибольшее значение, что указывает на существенную роль двойниковых границ в дислокационных и диффузионных процессах, обусловленных внутренними напряжениями. При этом толщина двойниковых границ соизмерима с межатомным расстоянием [13].

## ВЫВОД

На основании принципа суперпозиции разработан метод расчета смещений и напряжений в системе параллельных линзовидных остаточных механических двойников. Метод применен для расчета напряжений в мартенситной фазе  $Ni_2MnGa$ , в которой присутствует такая система двойников. Определены области локализации напряжений и изучена конфигурация полей смещений и напряжений в системе параллельных двойников, возникающих в монокристалле  $Ni_2MnGa$  при его локальном деформировании\*.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Giant Magnetic-Field-Induced Strain in NiMnGa Seven-Layered Martensitic Phase / A. Sozinov [et al.] // Applied Physics Lett. – 2002. – Vol. 80, No 10. – P. 1746–1748.
2. Heczko, O. Temperature Dependence and Temperature Limits of Magnetic Shape Memory Effect / O. Heczko, L. Straka // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 94, No 11. – P. 7139–7143.
3. 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.

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

4. **Large** Cyclic Deformation of a Ni–Mn–Ga Shape Memory Alloy Induced by Magnetic Fields / P. Mullner [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 92, No 11. – P. 6708–6713.

5. **Aaltio, I.** Magnetic Shape Memory Actuators / I. Aaltio, K. Ullakko // *Proc. of 7<sup>th</sup> International Conference on New Actuators, 19–21 June 2000, Bremen, Germany*. – Bremen, 2000. – P. 527–530.

6. **Hirsinger, L.** Modelling Detwinning of Martensite Platelets Under Magnetic and Stress Actions on Ni–Mn–Ga Alloys / L. Hirsinger, C. Lexcelent // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2003. – Vol. 254–255. – P. 275–277.

7. **Mullner, P.** Large Cyclic Magnetic-Field-Induced Deformation in Orthorhombic (14M) Ni–Mn–Ga Martensite / P. Mullner, V. A. Chernenko, G. Kostorz // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – Vol. 95, No 3. – P. 1531–1536.

8. **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, No 2. – P. 129–133.

9. **Остриков, О. М.** Исследование пластической деформации поверхности монокристалла Ni<sub>2</sub>MnGa методом индентирования / О. М. Остриков, А. Л. Созинов, А. В. Сорока // *Инженерно-физический журнал*. – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1132–1141.

10. **Остриков, О. М.** Механика двойникования твердых тел / О. М. Остриков. – Гомель: Гомельский гос. техн. ун-т имени П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

11. **Остриков, О. М.** Напряженное состояние у поверхности кристалла, деформируемой сосредоточенной нагрузкой, при наличии клиновидного двойника / О. М. Остриков // *Журнал технической физики*. – 2009. – Т. 79, № 5. – С. 137–139.

12. **Остриков, О. М.** Метод расчета распределения деформаций у клиновидного двойника с использованием подходов макроскопической дислокационной модели / О. М. Остриков // *Известия РАН. Механика твердого тела*. – 2009. – № 4. – С. 52–58.

13. **Шепелевич, В. Г.** Структурно-фазовые превращения в металлах / В. Г. Шепелевич. – Минск: БГУ, 2007. – 167 с.

#### REFERENCES

1. **Sozinov, A., Likhachev, B. A., Lanska, N., & Ullakko, K.** (2002) Giant Magnetic-Field-Induced Strain in NiMnGa Seven-Layered Martensitic Phase. *Applied Physics Lett.*, 80 (10), 1746–1748. Doi: 10.1063/1.1458075.

2. **Heczko, O., & Straka, L.** (2003) Temperature Dependence and Temperature Limits of Magnetic Shape Memo-

ry Effect. *Journal of Applied Physics*, 94 (11), 7139–7143. Doi: 10.1063/1.1626800.

3. **Heczko, O., Jurek, K., & Ullakko, K.** (2001) Magnetic Properties and Domain Structure of Magnetic Shape Memory Ni–Mn–Ga alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 226–230, 996–998. Doi: 10.1016/S0304-8853(00)01170-7.

4. **Mullner, P., Chernenko, V. A., Wollgarten, M., & Kostorz, G.** (2002) Large Cyclic Deformation of a Ni–Mn–Ga Shape Memory Alloy Induced by Magnetic Fields. *Journal of Applied Physics*, 92 (11), 6708–6713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1513875>.

5. **Aaltio, I., & Ullakko, K.** (2000) Magnetic Shape Memory Actuators. *Proc. of 7<sup>th</sup> International Conference on New Actuators, 19–21 June 2000, Bremen, Germany*, 527–530.

6. **Hirsinger, L., & Lexcelent, C.** (2003) Modelling Detwinning of Martensite Platelets Under Magnetic and Stress Actions on Ni–Mn–Ga Alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254–255, 275–277. Doi: 10.1016/S0304-8853(02)00773-4.

7. **Mullner, P., Chernenko, V. A., & Kostorz, G.** (2004) Large Cyclic Magnetic-Field-Induced Deformation in Orthorhombic (14M) Ni–Mn–Ga Martensite. *Journal of Applied Physics*, 95 (3), 1531–1536. Doi: 10.1063/1.1639144.

8. **Mullner, P., Chernenko, V. A., & Kostorz, G.** (2003) Stress-Induced Twin Rearrangement Resulting in Change of Magnetization in a Ni–Mn–Ga Ferromagnetic Martensite. *Scripta Materialia*, 49 (2), 129–133. Doi: 10.1016/S1359-6462(03)00219-7.

9. **Ostrikov, O. M., Sozinov, A. L., & Soroka, A. V.** (2012) Investigations of Plastic Deformation on Ni<sub>2</sub>MnGa Single Crystal Surface Using Indentation Method. *Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal* [Engineering and Physical Journal], 85 (5), 1132–1141 (in Russian).

10. **Ostrikov, O. M.** (2008) *Mechanics in Twinning of Solid Bodies*. Gomel: P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. 301 p. (in Russian).

11. **Ostrikov, O. M.** (2009) Stressed State at Crystal Surface Deformed by Concentrated Load with V-Type Twin. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki* [Journal of Applied Physics], 79 (5), 137–139 (in Russian).

12. **Ostrikov, O. M.** (2009) Method for Calculation of Deformation Distribution in V-Type Twin While Using Approaches of Macroscopic Dislocation Model. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Mehanika Tverdogo Tela* [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solids], 4, 52–58 (in Russian).

13. **Schepelevich, V. G.** (2007) *Structural and Phase Transformations in Metals*. Minsk: Belarusian State University. 167 p. (in Russian).

Поступила 18.02.2013