

8. **Галушко, В. Г.** Вероятностно-статистические методы на автотранспорте / В. Г. Галушко. – Киев: Вища шк., 1976. – 232 с.

9. **Конин, И. В.** Разработка метода оценки сложности автобусных маршрутов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / И. В. Конин. – М.: МАДИ, 1993. – 24 с.

10. **Гаврилов, Э. В.** Эргономика на автомобильном транспорте / Э. В. Гаврилов. – К.: Техника, 1976. – 152 с.

REFERENCES

1. **Dolia, V. K.** (2011) *Passenger Transportation*. Kharkov.: Publishing House "Fort". 504 p. (in Ukrainian).

2. **Spirin, I. V.** (2003) *Organization and Management of Passenger Transportation*. Moscow, Publishing Centre "Akademika". 400 p. (in Russian).

3. **Davidich, Yu. O.** (2006) *Development of Automotive Technical Processes with due Account of Driver's Psychophysiology: Monograph*. Kharkov: Kharkov National Automobile and Highway University. 292 p. (in Ukrainian).

4. **Gudkov, V. A., Mirotin, L. B., Vel'mozhin, A. V., & Shiriaev, S. A.** (2004) *Passenger Automotive Transportation*. Moscow, Goryachaya linia Telecom. 448 p. (in Russian).

5. **Verbitskaya, V. I.** (2002) *Planning of Budgetary Support for Organizations of Local Passenger Transport (Kharkov bus Transport Taken as an Example)*. Author's Abstract of PhD Thesis Research. Kharkov: Kharkov National Automobile and Highway University. 20 p. (in Russian).

6. **Kotelnikov, R. V.** (2000) One of the Methods for Selection of Weight Coefficients in Order to Take Decisions on the Basis of Utility Function. *Kibernetika i Tekhnologii XXI vek: Tezisy Dokladov Mezhdunarodnoi Konferentsii* [Computer Science and Technologies of the XXI Century: Proceedings of International Conference]. Voronezh: Voronezh State University, 185–190 (in Russian).

7. **Kotler, F.** (1998) *Marketing, Management: Analysis, Planning, Introduction, Control*. Saint-Petersburg, Piter. 888 p. (in Russian).

8. **Galushko, V. G.** (1976) *Probabilistic and Statistical Methods for Automotive Transportation*. Kiev, Vysshaya Shkola. 232 p.

9. **Konin, I. V.** (1993) *Development of Method for Assessment of Bus Route Complexity*. Author's Abstract of PhD Thesis Research [Engineering]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction University. 24 p. (in Russian).

10. **Gavrilov, E. V.** (1976) *Ergonomics in Automotive Transport*. Kiev, Tekhnika. 152 p. (in Russian).

Поступила 18.11.2014

УДК 539.4

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 двойникообразующих 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 σ_{xz} и σ_{zz} , однако численно компоненты отличны друг от друга примерно в два раза. Наибольшая величина возникающих напряжений в системе линзовидных двойников наблюдается у компонент σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{yy} , σ_{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 Ni₂MnGa-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 Ni₂MnGa 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 σ_{xz} and σ_{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 σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{yy} , σ_{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 Ni₂MnGa 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 Ni₂MnGa. 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 Ni₂MnGa 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.

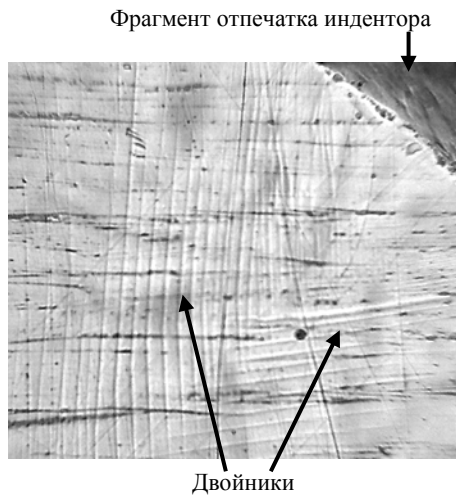


Рис. 1. Деформационная картина, возникающая на поверхности (100) монокристалла Ni_2MnGa , деформируемой алмазной пирамидой Виккерса (оптическая микроскопия $\times 150$)

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.

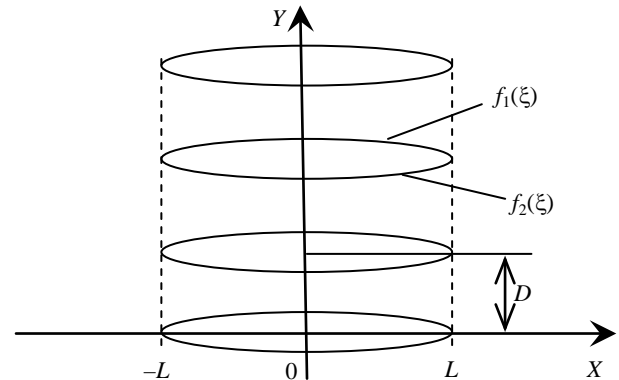


Рис. 2. Система параллельных линзовидных двойников

В приближении непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах, использованного в [10–12], смещения u_i и напряжения σ_{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:

$$u_i^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) u_i^{(1,0)} \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$u_i^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) u_i^{(2,0)} \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{ij}^{(1,0)} \times (x, y - nD, \xi) d\xi;$$

$$\sigma_{ij}^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-L}^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{ij}^{(2,0)} \times (x, y - nD, \xi) d\xi.$$

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; ξ – 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]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где μ – модуль сдвига; ν – 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].

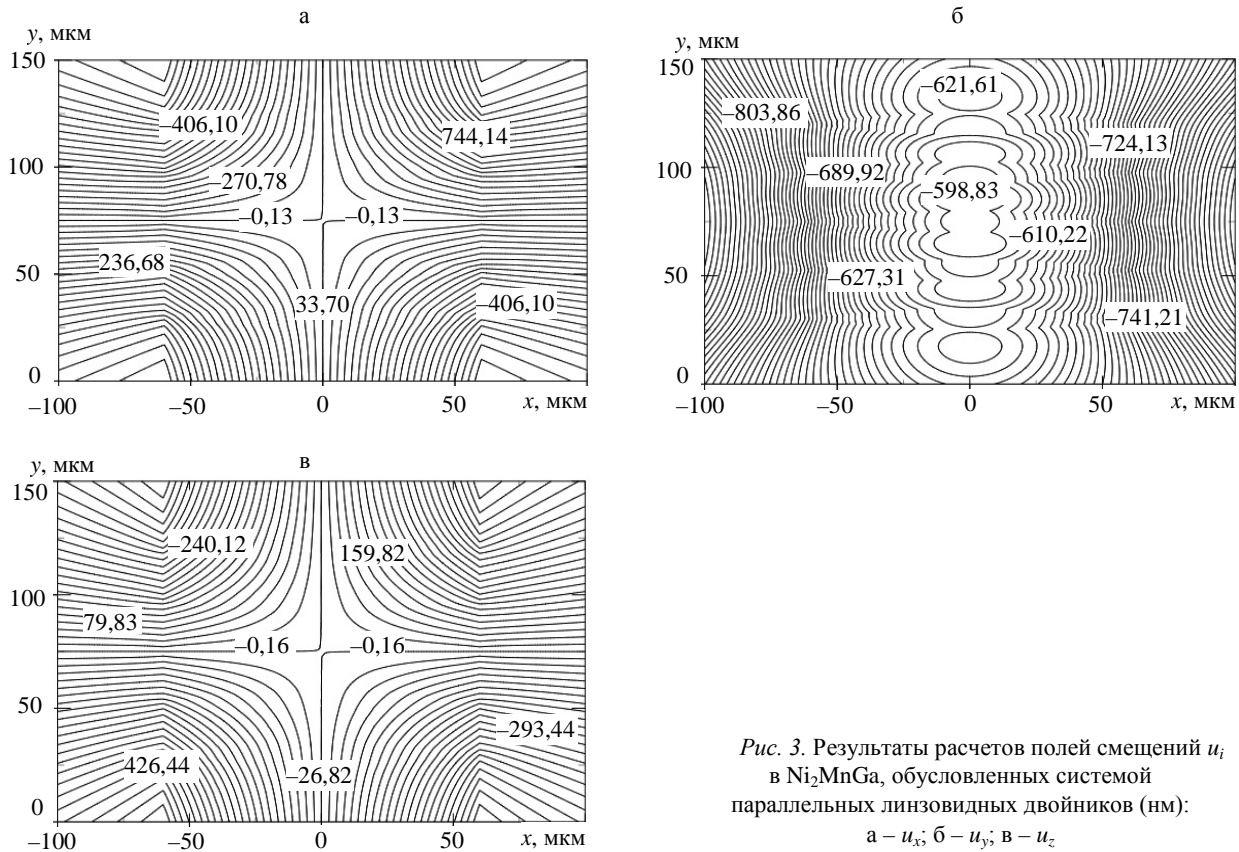


Рис. 3. Результаты расчетов полей смещений u_i в Ni_2MnGa , обусловленных системой параллельных линзовидных двойников (нм): а – u_x ; б – u_y ; в – u_z

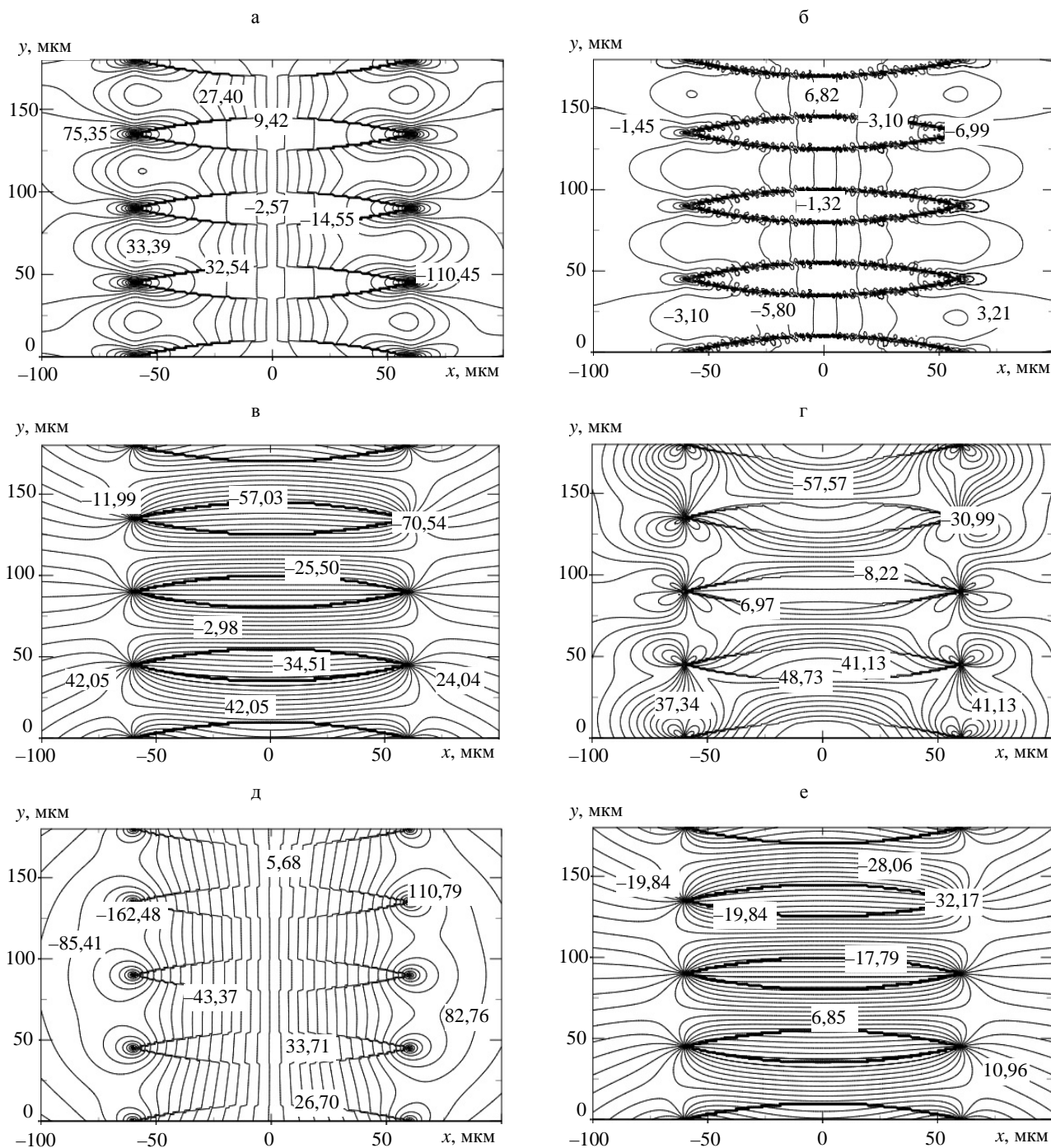


Рис. 4. Поля напряжений σ_{ij} в Ni_2MnGa , созданные параллельными линзовидными двойниками (МПа):
 а – σ_{xx} ; б – σ_{xy} ; в – σ_{xz} ; г – σ_{yy} ; д – σ_{yz} ; е – σ_{zz}

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 σ_{xx} . Максимальные по модулю значения

напряжений σ_{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 σ_{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 σ_{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 σ_{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 σ_{yy} . Как видно, напряжения σ_{yy} на оси OY по модулю минимальны в центральной части системы параллельных линзовидных двойников, а максимальны у крайних двойников.

Расчет сдвиговой компоненты σ_{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 σ_{zz} тензора напряжений, созданных рассматриваемой системой двойников, отображает рис. 4е. Конфигурация данных напряжений обладает схожестью с результатом, представленным на рис. 4е в случае компоненты σ_{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 7th 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. Lexcellent // *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 Ni₂MnGa 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 7th International Conference on New Actuators, 19–21 June 2000, Bremen, Germany*, 527–530.

6. **Hirsinger, L., & Lexcellent, 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 Ni₂MnGa 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