

## Влияние дислокационных и двойниковых структур на механические характеристики сплавов Ni–Mn–Ga на ультразвуковых частотах

© 2022

**Каминский Владимир Владимирович**<sup>\*1</sup>, аспирант института перспективных систем передачи данных  
**Калганов Дмитрий Александрович**<sup>2</sup>, магистрант института перспективных систем передачи данных  
**Подлеснов Екатерина**<sup>3</sup>, аспирант института перспективных систем передачи данных  
**Романов Алексей Евгеньевич**<sup>4</sup>, доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор института перспективных систем передачи данных  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург (Россия)

\*E-mail: kam-vladimiro@yandex.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4388-2459>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1986-3693>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0520-9407>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>

Поступила в редакцию 06.05.2022

Принята к публикации 16.06.2022

**Аннотация:** Магнитные сплавы с памятью формы являются особым подвидом материалов с эффектом памяти формы. Высокий исследовательский интерес к ним обусловлен явлением магнитодеформации. Так, в одном из наиболее перспективных сплавов на основе Ni–Mn–Ga при помощи магнитного поля возможно добиться изменения размера монокристалла до 10 % за счет переориентации магнитного поля в магнитных доменах. Высокая магнитная деформация напрямую связана с высокой подвижностью двойниковых границ, разделяющих два домена. В настоящей работе методом составного пьезоэлектрического осциллятора на частоте 100 кГц определено влияние дефектов, таких как дислокации и двойниковые границы, на механические характеристики Ni<sub>49</sub>Mn<sub>30</sub>Ga<sub>21</sub>. Исследованы особенности температурных зависимостей внутреннего трения в образцах до и после деформации, построены амплитудные зависимости данных характеристик. В изучаемой мартенситной фазе монокристалла обнаружен фазовый переход из тетрагональной фазы в орторомбическую при 235 К. В тетрагональной фазе Ni–Mn–Ga образование новых дефектов способствует более ярко выраженному и раннему началу амплитудно-зависимого внутреннего трения. При более низких нагрузках проходят последовательные стадии, связанные с процессами движения дислокаций и двойниковых границ внутри облаков Коттрелла, движения дислокаций и двойниковых границ вне облаков Коттрелла и, предположительно, торможения движения границ двойников и дислокаций за счет их взаимодействия. Наряду с внутренним трением исследовано изменение модуля Юнга. Его уменьшение при всех температурах наиболее выражено в образцах с дефектными структурами. Установлено, что в орторомбической фазе зависимость внутреннего трения от амплитуды деформации наблюдается при меньшей нагрузке благодаря увеличению подвижности двойниковых границ с ростом температуры.

**Ключевые слова:** магнитная память формы; магнитодеформация; модуль Юнга; внутреннее трение; дефекты; дислокации; двойники; Ni–Mn–Ga.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90195.

**Для цитирования:** Каминский В.В., Калганов Д.А., Подлеснов Е., Романов А.Е. Влияние дислокационных и двойниковых структур на механические характеристики сплавов Ni–Mn–Ga на ультразвуковых частотах // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. С. 28–36. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-28-36.

### ВВЕДЕНИЕ

Особую категорию материалов с эффектом памяти формы составляют сплавы с магнитной памятью формы, в которых наблюдается эффект магнитоиндуцированной переориентации намагниченности доменов. Связанная с этим деформация материалов достигает феноменальных значений – до 10 % [1–3]. Наибольшее распространение благодаря своим уникальным свойствам получили сплавы на основе Ni–Mn–Ga. Причиной эффекта магнитной памяти формы в них является особая подвижность двойниковых границ, которые, в свою очередь, являются стенками магнитных доменов. Движение двойниковых границ – основной механизм маг-

нитной деформации. При приложении магнитного поля энергетически предпочтительны те варианты двойников, которые имеют ось легкого намагничивания вдоль направления поля. Эти варианты растут под действием поля за счет неблагоприятно ориентированных, что приводит к гигантской магнитной деформации. Такой эффект также был назван «магнитно-индуцированной переориентацией», потому что варианты различаются кристаллографической ориентацией, и поэтому значительное количество материала меняет свою кристаллографическую ориентацию во время этого процесса [3].

Высокая магнитная деформация напрямую связана с высокой подвижностью двойниковых границ, разделяющих два домена. В связи с этим возникает

потребность в исследовании механизмов, определяющих этот процесс. Ранее влияние двойников  $a/b$  и  $a/c$  на механические характеристики, такие как модуль Юнга и внутреннее трение (ВТ), было изучено для  $\text{Ni}_{50,2}\text{Mn}_{28,3}\text{Ga}_{21,5}$  [4]. Двойники делятся на  $a/b$  и  $a/c$  в соответствии с осями элементарной ячейки в исследуемом материале [5]. Установлено, что сверхвысокое затухание и низкий модуль Юнга в направлении [100] обусловлены колебательным движением благоприятно ориентированных  $a/b$ -двойников [4]. В работе [6] с более сложным набором двойников в  $\text{Ni}_{50,2}\text{Mn}_{28,3}\text{Ga}_{21,5}$  особенности этих взаимодействий были определены детально. Выяснилось, что часть двойниковых структур типа  $a/c$  фиксируется облаками Коттрелла, а другая свободна от пиннинга. Было показано, что анизотропия теплового расширения приводит к перемещению границ двойников  $a/c$  при колебаниях температуры. В широком диапазоне температур система двойников  $a/b$  находится в сильно неравновесном состоянии.

Цель исследования – рассмотрение влияния деформации с образованием новых двойниковых структур и дислокаций на механические свойства в образцах  $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{30}\text{Ga}_{21}$ .

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование основано на методе пьезоэлектрического составного осциллятора [7]. Используя этот метод, можно получить температурные и амплитудные зависимости продольного модуля упругости – модуля Юнга  $E$  и внутреннего трения  $\delta$  в широком температурном диапазоне. Эти значения измеряются одновременно и характеризуют различные процессы, протекающие в материале, в том числе на наномасштабе. К кварцевому резонатору прикладывается переменное электрическое напряжение заданной амплитуды, заставляющее его колебаться за счет пьезоэлектрического эффекта. Это колебание переносится на исследуемый образец. Измерения возможны только при образовании стоячей волны в системе «кварц – образец». Величина затухания колебаний в образце определяет внутреннее трение, в то время как изменения частоты соответствуют эффективным значениям модуля Юнга [8]. Модуль Юнга рассчитывается исходя из частоты резонансных колебаний  $f$ , плотности образца  $\rho$  и его длины  $l$ :

$$E = 4\rho f^2 l^2.$$

Внутреннее трение представляет собой отношение между энергией, рассеиваемой в цикле колебаний  $\Delta W$ , и максимальной накопленной упругой энергией  $W$ :

$$\delta \propto \frac{\Delta W}{W}.$$

Следует более подробно остановиться на основных стадиях зависимости ВТ от амплитуды колебаний. В нашей работе мы разделяем амплитудно-независимое внутреннее трение (АНВТ) и амплитудно-зависимое внутреннее трение (АЗВТ). АНВТ – это первая стадия внутреннего трения, при которой ВТ не меняется при изменении амплитуды. АЗВТ является второй стадией

внутреннего трения, в которой ВТ изменяется с амплитудой. Нередко при АЗВТ изменяется и модуль Юнга, появляется такая характеристика, как дефект модуля Юнга, определяемый из соотношения

$$\Delta E = \frac{(E_i - E(\epsilon))}{E_i},$$

где  $E_i$  – модуль упругости на амплитудно-независимой стадии;

$E(\epsilon)$  – модуль упругости на амплитудно-зависимой стадии;

$\epsilon$  – амплитуда деформации образца.

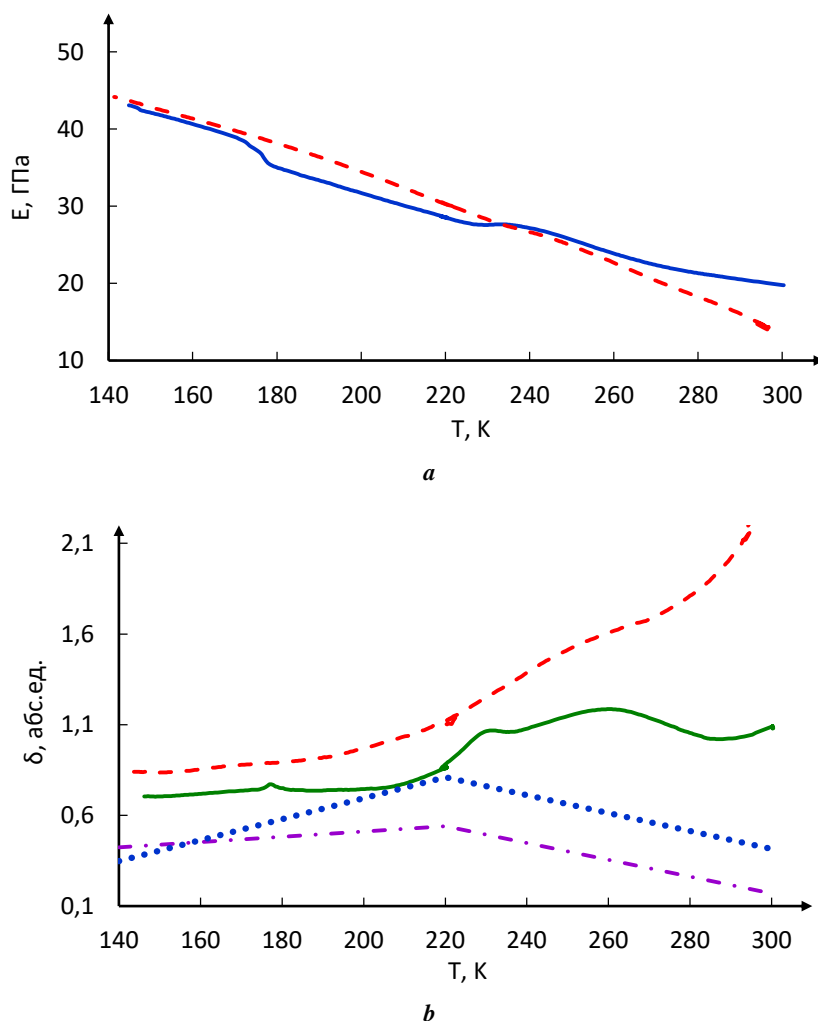
В настоящей работе исследовались монокристаллы состава  $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{30}\text{Ga}_{21}$ , полученные методом Бриджмена с последующей термообработкой. Образцы для акустических измерений имели прямоугольное сечение и соответствующую условию резонанса длину. Линейные размеры образцов приблизительно равнялись  $8,4 \times 1,8 \times 1,1 \text{ мм}^3$ . Резонансные колебания возбуждались в направлении [100]. Для решения поставленных задач часть образцов подвергалась механической деформации с образованием двойников различного типа, наличие которых подтверждалось методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Механическая деформация монокристаллических образцов с образованием двойников осуществлялась приложением нагрузки вдоль кристаллографического направления [100] с использованием прессы при давлении около 2 МПа. Для исследований образцов методом составного пьезоэлектрического осциллятора в различных фазовых состояниях использовались значения температур фазовых переходов, полученные для данных образцов ранее в [2] методом спектроскопии импеданса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 а представлена температурная зависимость модуля Юнга. После деформации модуль упругости уменьшается. При комнатной температуре модуль Юнга до деформации составлял  $E=20$  ГПа, после –  $E=14$  ГПа. При низких температурах разница между модулем Юнга в образцах до и после деформации не существенна ( $E \approx 42$  ГПа) и отличается на величину не более погрешности измерения.

Средние значения для АЗВТ после деформации выше, чем до нее (рис. 1 б). Это изменение менее выражено при низких температурах. Перегиб кривой модуля Юнга и плавный пик ВТ, наблюдаемый при 235 К, указывает на фазовый переход в тетрагональную фазу. Дополнительно на графике отмечено АНВТ при трех температурах. На температурных зависимостях у образца до деформации также наблюдается перегиб кривой модуля Юнга (рис. 1 а) и пик ВТ около 181 К.

Деформация кристалла приводила к образованию различных типов двойников. Эти двойники либо имели вид строгой периодичной структуры (рис. 2 а), либо были разориентированы под небольшими углами (рис. 2 б). Расстояние между двойниковыми границами в множественно сдвойникованном кристалле находилось в диапазоне от 10 до 60 мкм (рис. 2 а). Такая структура распространялась на всю ширину образца – 1,8 мм.



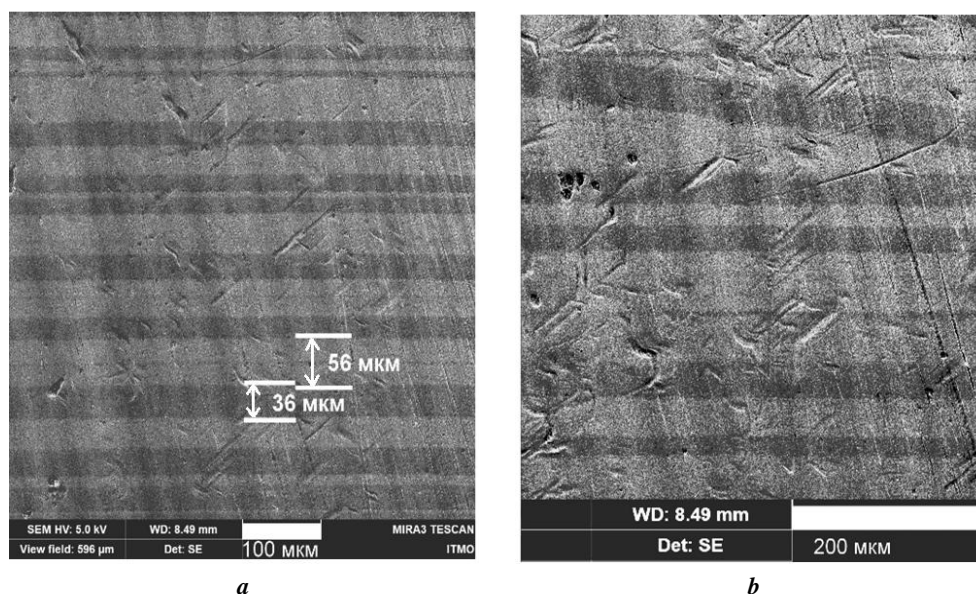
**Рис. 1.** Температурные зависимости параметров исследуемых образцов:  
**a** – модуль Юнга до деформации (сплошная линия) и после деформации (пунктирная линия);  
**b** – внутреннее трение: амплитудно-зависимая часть до деформации (штрихованная линия);  
 амплитудно-зависимая часть после деформации (сплошная линия);  
 уровень амплитудно-независимого внутреннего трения, указанный по измерениям  
 в точках 140 К, 220 К и 300 К до деформации (точечная линия);  
 уровень амплитудно-независимого внутреннего трения, указанный по измерениям  
 в точках 140 К, 220 К и 300 К после деформации (штрихпунктирная линия)

**Fig. 1.** Temperature dependences of the studied samples parameters:  
**a** – Young’s modulus before deformation (a solid line) and after deformation (a dashed line);  
**b** – internal friction: an amplitude-dependent part before deformation (a hatched line);  
 an amplitude-dependent part after deformation (a solid line);  
 the level of amplitude-independent internal friction specified according to the measurements  
 at the points 140 K, 220 K and 300 K before deformation (a dotted line);  
 the level of amplitude-independent internal friction specified according to the measurements  
 at the points 140 K, 220 K and 300 K after deformation (a dash-dotted line)

На рис. 3 а представлены амплитудные зависимости внутреннего трения. После деформации амплитудно-зависимая часть внутреннего трения проявляется при меньших амплитудах. Величина и наклон АЗВТ после деформации увеличиваются, гистерезис остается неизменным и обратимым. Фоновое внутреннее трение увеличивается с ростом температуры для всех зависимостей. После деформации появляется АЗВТ с амплитудой  $1,41 \cdot 10^{-6}$  при 220 К и  $1,37 \cdot 10^{-6}$  при 140 К. До деформации АЗВТ появляется при  $3,27 \cdot 10^{-6}$  при 220 К и  $2,26 \cdot 10^{-6}$  при 140 К. При 140 К

амплитуда роста выше более чем в 1,5 раза, а при 220 К – почти в 2,5 раза. С повышением температуры амплитудно-зависимая часть сдвигается в область больших амплитуд. При 300 К наблюдается более ранняя стадия АЗВТ (рис. 3 б).

Кривая АЗВТ может быть подразделена на три части. Особенно хорошо это заметно на образцах после деформации (рис. 3 а). Первая часть – малоамплитудная – обозначена сплошной линией, вторая – среднеамплитудная – штриховой, третья – высокоамплитудная – штрихпунктирной.



**Рис. 2.** Изображения поверхности исследуемых образцов, полученные методом сканирующей электронной микроскопии. Периодическая структура двойников, образовавшихся после деформации:

*a* – строгая параллельная (отмечены характерные расстояния между внешними и внутренними границами двойников);  
*b* – частично разориентированная

**Fig. 2.** The images of the samples' surface produced by the scanning electron microscopy method.

The periodic structure of twins formed after deformation:

*a* – strong parallel (typical distances between the external and internal twin boundaries are indicated);  
*b* – partially disordered

Как можно видеть (рис. 3 а), после деформации данные стадии становятся ярко выраженными и появляются при более низкой амплитуде, что подтверждается на серии образцов.

На рис. 4 представлены амплитудные зависимости дефекта модуля Юнга до и после деформации. В образцах после деформации соответствующие величины возрастают вдвое при 140 К и чуть менее чем в 5 раз при 220 К. При более высокой температуре 300 К после деформации также видно увеличение дефекта модуля Юнга и увеличение микропластической деформации.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

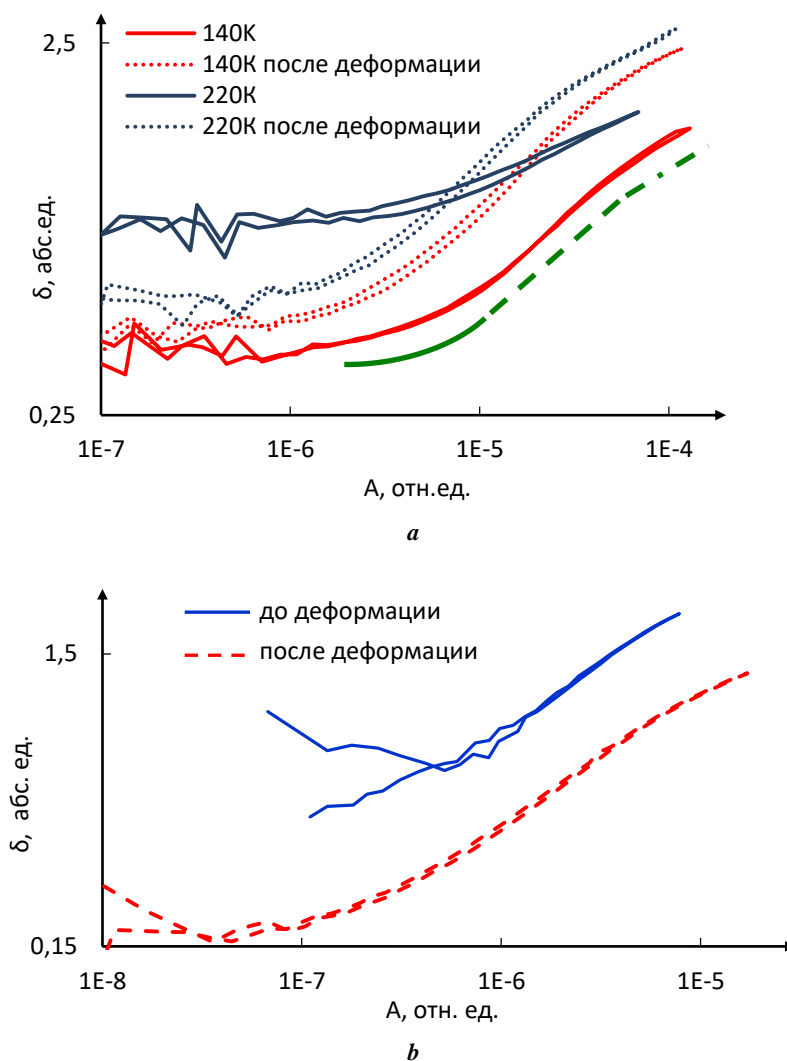
Определено влияние дислокаций и двойниковых структур на механические характеристики мартенситной фазы  $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{30}\text{Ga}_{21}$ . Обнаружено уменьшение упругих характеристик в материале после деформации при комнатной температуре с одновременным увеличением АЗВТ. В данном случае пластическая деформация увеличивает плотность дефектных структур, таких как двойники и дислокации. Данные изменения в модуле Юнга и ВТ проявляются во многих материалах [9; 10]. Однако влияние двойников на механические характеристики сильно зависит от их ориентации относительно направления колебания монокристалла [4; 6]. На температурных зависимостях модуля Юнга и внутреннего трения до деформации при температуре 235 К можно заметить в первом случае перегиб, а во втором – пик (рис. 1). Эти эффекты можно однозначно связать с орторомбическим – тетрагональным фазовым переходом [2].

Исследуемая кристаллическая структура мартенситной низкотемпературной фазы в материале представлена двумя видами – орторомбической семислойной модулированной фазой и тетрагональной немодулированной фазой с разными симметриями элементарной ячейки. Большое влияние на температуры фазовых переходов оказывает стехиометрия монокристаллов [11]. После пластической деформации на температурных зависимостях данный переход становится менее заметен. На температурных зависимостях можно увидеть схожее явление около 178 К, возможно связанное с модуляцией структуры [12], хотя в некоторых работах его определяют как пик движения двойниковой границы – “twin boundary motion peak” [13].

В аустенитной высокотемпературной фазе, в данном материале на частоте 100 кГц, амплитудные зависимости внутреннего трения и модуля упругости обусловлены релаксацией из-за вихревых токов, а точнее, связаны с изменением магнитного потока в ферромагнетике за счет колебательной деформации в домене [14]. В мартенситной фазе эти механизмы отличаются.

Разберем данные стадии подробно, используя амплитудную зависимость ВТ после деформации при 220 К (рис. 3 а). Малоамплитудная стадия АЗВТ соответствует движению двойников и дислокаций внутри облаков Коттрелла (обозначена сплошной линией). Облаками Коттрелла мы называем область с повышенной концентрацией вакансий, на которой происходит закрепление (пиннинг) дислокаций и двойниковых границ. В пользу образования облаков Коттрелла из повышенной концентрации вакансий, а не примесей говорят недавние исследования, выполненные на схожем





**Рис. 3.** Амплитудные зависимости внутреннего трения:

**a** – внутреннее трение в орторомбической фазе при 140 и 220 К до деформации (сплошные линии) и после деформации (точечные линии).

Пояснение трех последовательных стадий амплитудно-зависимого внутреннего трения на нижней кривой сплошной, штрихованной и штрихпунктирной линиях;

**b** – внутреннее трение в тетрагональной фазе при 300 К до деформации (сплошная линия) и после деформации (пунктирная линия)

**Fig. 3.** The internal friction amplitude dependences:

**a** – the internal friction in the orthorhombic phase at 140 and 220 K before deformation (solid lines) and after deformation (dotted lines).

The explanation of three successive stages of amplitude-dependent internal friction on the lower curved solid, dashed, and dash-dotted lines;

**b** – the internal friction in the tetragonal phase at 300 K before deformation (a solid line) and after deformation (a dashed line)

материале [15]. Резкий рост внутреннего трения на средней амплитудной стадии (пунктирная линия) соответствует откреплению двойниковых границ и дислокаций от облаков Коттрелла и переходу к движению двойников и дислокаций в однородном пространстве вне облаков. При высоких амплитудах, например, таких как  $3 \cdot 10^{-5}$  для деформированных образцов при низких температурах и  $5 \cdot 10^{-6}$  для высоких, наблюдается дополнительная стадия АЗВТ. На данной стадии происходит, предположительно, торможение движения двойников и дислокаций за счет их взаимодействия друг с другом (штрихпунктирная линия). После процесса

деформации данные стадии более ярко выражены, так как свежие дефектные структуры, такие как двойники и дислокации, обладают высокой подвижностью. Это же можно заметить по амплитудным зависимостям дефекта модуля Юнга (рис. 4). В рамках данной модели амплитудный гистерезис ВТ подразумевает перераспределение центров пиннинга, составляющих облака Коттрелла, движущимися двойниковыми границами [16–18]. Делпиннинг двойников в кристалле происходит при амплитуде деформации около  $1 \cdot 10^{-6}$  [6]. Большая подвижность двойников в ортогональной фазе (рис. 3 b), чем в тетрагональной (рис. 3 a), косвенно подтверждается

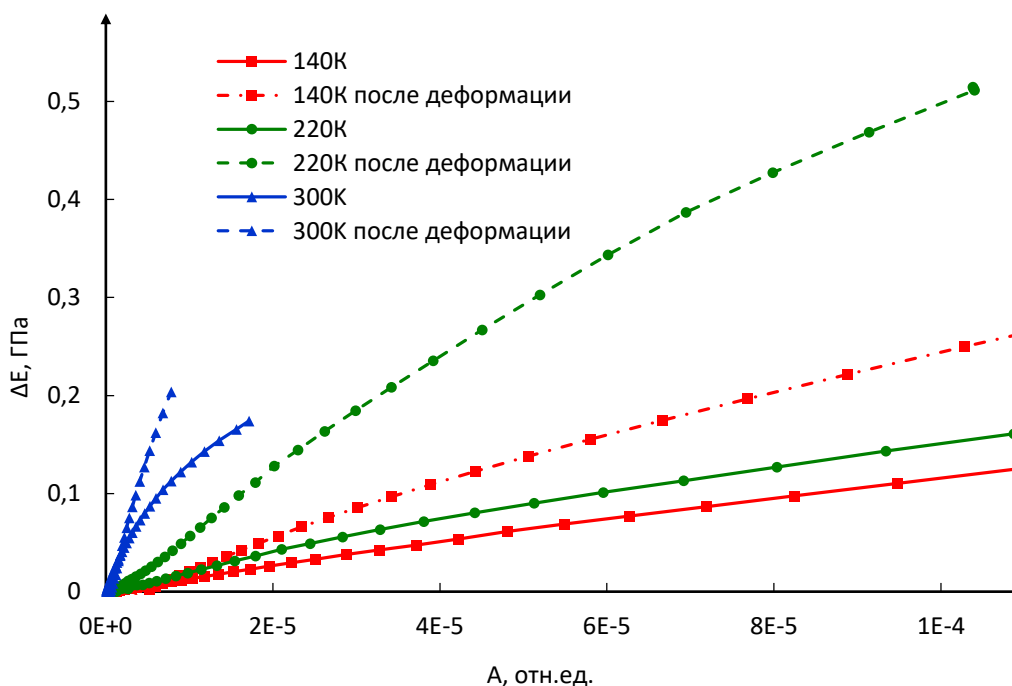


Рис. 4. Амплитудные зависимости дефекта модуля Юнга до деформации (сплошные линии) и после деформации (пунктирные линии)

Fig. 4. Amplitude dependences of the Young's modulus defect before deformation (solid lines) and after deformation (dashed lines)

в работах [19; 20]. Так, на зависимостях при 300 К АЗВТ начинается раньше, чем при более низких температурах. Напряжения, обусловленные анизотропией теплового расширения, являются еще одной из причин облегчения выхода двойных границ из атмосфер точечных дефектов при высоких температурах. Анизотропия теплового расширения некубических мартенситных фаз сплавов с памятью формы обычно довольно высока [21].

Дефект модуля Юнга в образцах после деформации увеличивается при всех исследуемых температурах. Он определяется как плотностью дефектных структур, так и их распределением по длине и сечению образца, но главную роль играет плотность дефектных структур [22]. Несмотря на то, что дефектность структуры играет первостепенную роль, температура также оказывает существенное влияние на данную характеристику. При росте температуры растет дефект модуля. В данном случае амплитудные зависимости дефекта модуля Юнга связаны с АЗВТ и отражают изменения микроструктуры образца, соответствующие их стадиям.

## ВЫВОДЫ

Размытый пик внутреннего трения и перегиб модуля Юнга свидетельствуют о переходе материала из орторомбической в тетрагональную фазу при 235 К. Дислокации и двойниковые структуры уменьшают данное явление, одновременно увеличивая дефект модуля Юнга при всех температурах. В орторомбической фазе Ni–Mn–Ga образование дефектов способствует более ярко выраженному и раннему появлению амплитудно-за-

висимого внутреннего трения, характеризующего определенные стадии микродеформации в образце: 1) движение двойников и дислокаций внутри облаков Коттрелла; 2) движение двойников и дислокаций вне облаков Коттрелла; 3) торможение движения двойников и дислокаций за счет их взаимодействия. В орторомбической фазе стадия амплитудно-зависимого внутреннего трения наступает при меньших амплитудах благодаря увеличению подвижности двойниковых границ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Straka L., Heczko O., Seiner H., Lanska N., Drahokoupil J., Soroka A., Fahler S., Hanninen H., Sozinov A. Highly mobile twinned interface in 10 M modulated Ni-Mn-Ga martensite: Analysis beyond the tetragonal approximation of lattice // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. № 20. P. 7450–7463. DOI: [10.1016/j.actamat.2011.09.020](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.09.020).
2. Sozinov A., Likhachev A.A., Lanska N., Ullakko K. Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase // *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 80. № 10. P. 1746–1748. DOI: [10.1063/1.1458075](https://doi.org/10.1063/1.1458075).
3. Acet M., Mañosa Ll., Planes A. Magnetic-field-induced effects in martensitic Heusler-based magnetic shape memory alloys // *Handbook of magnetic materials*. 2011. Vol. 19. № C. P. 231–289. DOI: [10.1016/B978-0-444-53780-5.00004-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53780-5.00004-1).
4. Kustov S., Saren A., Sozinov A., Kaminskii V., Ullakko K. Ultrahigh damping and Young's modulus softening due

- to a/b twins in 10M Ni-Mn-Ga martensite // *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 178. P. 483–488. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.12.024](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.12.024).
5. Saren A., Sozinov A., Kustov S., Ullakko K. Stress-induced *a/b* compound twins redistribution in 10M Ni-Mn-Ga martensite // *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 175. P. 11–15. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.09.001](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.09.001).
  6. Kustov S., Saren A., D'Agosto B., Sapozhnikov K., Nikolaev V., Ullakko K. Transitory Ultrasonic Absorption in “Domain Engineered” Structures of 10 M Ni-Mn-Ga Martensite // *Metals*. 2021. Vol. 11. № 10. Article number 1505. DOI: [10.3390/met11101505](https://doi.org/10.3390/met11101505).
  7. Robinson W.H., Carpenter S.H., Tallon J.L. Piezoelectric method of determining torsional mechanical damping between 40 and 120 kHz // *Journal of Applied Physics*. 1974. Vol. 45. № 5. P. 1975–1981. DOI: [10.1063/1.1663533](https://doi.org/10.1063/1.1663533).
  8. Kustov S., Golyandin S., Ichino A., Gremaud G. A new design of automated piezoelectric composite oscillator technique // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 442. № 1-2. P. 532–537. DOI: [10.1016/j.msea.2006.02.230](https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.230).
  9. Kaminskii V.V., Lyubimova Y.V., Romanov A.E. Probing of polycrystalline magnesium at ultrasonic frequencies by mechanical spectroscopy // *Mater Physics and Mechanics*. 2020. Vol. 44. № 1. P. 19–25. DOI: [10.18720/MPM.4412020\\_3](https://doi.org/10.18720/MPM.4412020_3).
  10. Benito J.A., Manero J.M., Jorba J., Roca A. Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2005. Vol. 36. № 12. P. 3317–3324. DOI: [10.1007/s11661-005-0006-6](https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6).
  11. Lanska N., Soderberg O., Sozinov A., Ge Y., Ullakko K., Lindroos V.K. Composition and temperature dependence of the crystal structure of Ni-Mn-Ga alloys // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95. № 12. P. 8074–8078. DOI: [10.1063/1.1748860](https://doi.org/10.1063/1.1748860).
  12. Cesari E., Chernenko V.A., Kokorin V.V., Pons J., Segui C. Internal friction associated with the structural phase transformations in Ni-Mn-Ga alloys // *Acta materialia*. 1997. Vol. 45. № 3. P. 999–1004. DOI: [10.1016/S1359-6454\(96\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00244-3).
  13. Chang S.H., Wu S.K. Low-frequency damping properties of near-stoichiometric Ni<sub>2</sub>MnGa shape memory alloys under isothermal conditions // *Scripta Materialia*. 2008. Vol. 59. № 10. P. 1039–1042. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2008.07.006](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.07.006).
  14. Kustov S., Corró M.-L., Kaminskii V., Saren A., Sozinov A., Ullakko K. Elastic and anelastic phenomena related to eddy currents in cubic Ni<sub>2</sub>MnGa // *Scripta Materialia*. 2018. Vol. 147. P. 69–73. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.003).
  15. Sapozhnikov K., Kustov B., Krymov V., Nikolaev V. Anelasticity of the martensitic phase of Ni<sub>55</sub>Fe<sub>18</sub>Ga<sub>27</sub> single crystals in hyperstabilized and nonstabilized states // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 908. Article number 164528. DOI: [10.1016/j.jallcom.2022.164528](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164528).
  16. Kustov S., Liubimova Iu., Salje E.K.H. LaAlO<sub>3</sub>: A substrate material with unusual ferroelastic properties // *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 112. № 4. Article number 042902. DOI: [10.1063/1.5017679](https://doi.org/10.1063/1.5017679).
  17. Sapozhnikov K., Golyandin S., Kustov S., Van Humbeeck J., De Batist R. Motion of dislocations and interfaces during deformation of martensitic Cu–Al–Ni crystals // *Acta materialia*. 2000. Vol. 48. № 5. P. 1141–1151. DOI: [10.1016/S1359-6454\(99\)00374-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00374-2).
  18. Kustov S., Sapozhnikov K., Wang X. Phenomena associated with diffusion, assisted by moving interfaces in shape memory alloys: A review of our earlier studies // *Functional Materials Letters*. 2017. Vol. 10. № 1. Article number 1740010. DOI: [10.1142/S1793604717400100](https://doi.org/10.1142/S1793604717400100).
  19. Heczko O., Straka L., Seiner H. Different microstructures of mobile twin boundaries in 10 M modulated Ni-Mn-Ga martensite // *Acta materialia*. 2013. Vol. 61. № 2. P. 622–631. DOI: [10.1016/j.actamat.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.007).
  20. Sozinov A., Likhachev A.A., Lanska N., Söderberg O., Ullakko K., Lindroos V.K. Stress-and magnetic-field-induced variant rearrangement in Ni–Mn–Ga single crystals with seven-layered martensitic structure // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 378. № 1-2. P. 399–402. DOI: [10.1016/j.msea.2003.10.365](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.365).
  21. L'vov V.A., Glavatska N., Aaltio I., Söderberg O., Glavatsky I., Hannula S.-P. The role of anisotropic thermal expansion of shape memory alloys in their functional properties // *Acta materialia*. 2009. Vol. 57. № 18. P. 5605–5612. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.07.058](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.058).
  22. Лебедев А.Б., Кустов С.Б., Кардашев Б.К. О внутреннем трении и дефекте модуля Юнга в процессе деформирования кристаллов // *Физика твердого тела*. 1992. Т. 34. № 9. С. 2915–2921.

## REFERENCES

1. Straka L., Heczko O., Seiner H., Lanska N., Drahokoupil J., Soroka A., Fahler S., Hanninen H., Sozinov A. Highly mobile twinned interface in 10 M modulated Ni-Mn-Ga martensite: Analysis beyond the tetragonal approximation of lattice. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, no. 20, pp. 7450–7463. DOI: [10.1016/j.actamat.2011.09.020](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.09.020).
2. Sozinov A., Likhachev A.A., Lanska N., Ullakko K. Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase. *Applied Physics Letters*, 2002, vol. 80, no. 10, pp. 1746–1748. DOI: [10.1063/1.1458075](https://doi.org/10.1063/1.1458075).
3. Acet M., Mañosa Ll., Planes A. Magnetic-field-induced effects in martensitic Heusler-based magnetic shape memory alloys. *Handbook of magnetic materials*, 2011, vol. 19, no. C, pp. 231–289. DOI: [10.1016/B978-0-444-53780-5.00004-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53780-5.00004-1).
4. Kustov S., Saren A., Sozinov A., Kaminskii V., Ullakko K. Ultrahigh damping and Young's modulus softening due to a/b twins in 10M Ni-Mn-Ga martensite. *Scripta Materialia*, 2020, vol. 178, pp. 483–488. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.12.024](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.12.024).
5. Saren A., Sozinov A., Kustov S., Ullakko K. Stress-induced *a/b* compound TWINS redistribution in 10M Ni-Mn-Ga martensite. *Scripta Materialia*, 2020, vol. 175, pp. 11–15. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.09.001](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.09.001).
6. Kustov S., Saren A., D'Agosto B., Sapozhnikov K., Nikolaev V., Ullakko K. Transitory Ultrasonic Absorption in “Domain Engineered” Structures of 10 M Ni-Mn-Ga Martensite. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 10, article number 1505. DOI: [10.3390/met11101505](https://doi.org/10.3390/met11101505).

7. Robinson W.H., Carpenter S.H., Tallon J.L. Piezoelectric method of determining torsional mechanical damping between 40 and 120 kHz. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no. 5, pp. 1975–1981. DOI: [10.1063/1.1663533](https://doi.org/10.1063/1.1663533).
8. Kustov S., Golyandin S., Ichino A., Gremaud G. A new design of automated piezoelectric composite oscillator technique. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 442, no. 1-2, pp. 532-537. DOI: [10.1016/j.msea.2006.02.230](https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.230).
9. Kaminskii V.V., Lyubimova Y.V., Romanov A.E. Probing of polycrystalline magnesium at ultrasonic frequencies by mechanical spectroscopy. *Mater Physics and Mechanics*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 19–25. DOI: [10.18720/MPM.4412020\\_3](https://doi.org/10.18720/MPM.4412020_3).
10. Benito J.A., Manero J.M., Jorba J., Roca A. Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2005, vol. 36, no. 12, pp. 3317–3324. DOI: [10.1007/s11661-005-0006-6](https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6).
11. Lanska N., Soderberg O., Sozinov A., Ge Y., Ullakko K., Lindroos V.K. Composition and temperature dependence of the crystal structure of Ni–Mn–Ga alloys. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 95, no. 12, pp. 8074–8078. DOI: [10.1063/1.1748860](https://doi.org/10.1063/1.1748860).
12. Cesari E., Chernenko V.A., Kokorin V.V., Pons J., Segui C. Internal friction associated with the structural phase transformations in Ni–Mn–Ga alloys. *Acta materialia*, 1997, vol. 45, no. 3, pp. 999–1004. DOI: [10.1016/S1359-6454\(96\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00244-3).
13. Chang S.H., Wu S.K. Low-frequency damping properties of near-stoichiometric Ni<sub>2</sub>MnGa shape memory alloys under isothermal conditions. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 59, no. 10, pp. 1039–1042. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2008.07.006](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.07.006).
14. Kustov S., Corró M.-L., Kaminskii V., Saren A., Sozinov A., Ullakko K. Elastic and anelastic phenomena related to eddy currents in cubic Ni<sub>2</sub>MnGa. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 147, pp. 69–73. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.003).
15. Sapozhnikov K., Kustov B., Krymov V., Nikolaev V. Anelasticity of the martensitic phase of Ni<sub>55</sub>Fe<sub>18</sub>Ga<sub>27</sub> single crystals in hyperstabilized and nonstabilized states. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 908, article number 164528. DOI: [10.1016/j.jallcom.2022.164528](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164528).
16. Kustov S., Liubimova Iu., Salje E.K.H. LaAlO<sub>3</sub>: A substrate material with unusual ferroelastic properties. *Applied Physics Letters*, 2018, vol. 112, no. 4, article number 042902. DOI: [10.1063/1.5017679](https://doi.org/10.1063/1.5017679).
17. Sapozhnikov K., Golyandin S., Kustov S., Van Humbeeck J., De Batist R. Motion of dislocations and interfaces during deformation of martensitic Cu–Al–Ni crystals. *Acta materialia*, 2000, vol. 48, no. 5, pp. 1141–1151. DOI: [10.1016/S1359-6454\(99\)00374-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00374-2).
18. Kustov S., Sapozhnikov K., Wang X. Phenomena associated with diffusion, assisted by moving interfaces in shape memory alloys: A review of our earlier studies. *Functional Materials Letters*, 2017, vol. 10, no. 1, article number 1740010. DOI: [10.1142/S1793604717400100](https://doi.org/10.1142/S1793604717400100).
19. Heczko O., Straka L., Seiner H. Different microstructures of mobile twin boundaries in 10 M modulated Ni–Mn–Ga martensite. *Acta materialia*, 2013, vol. 61, no. 2, pp. 622–631. DOI: [10.1016/j.actamat.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.007).
20. Sozinov A., Likhachev A.A., Lanska N., Söderberg O., Ullakko K., Lindroos V.K. Stress-and magnetic-field-induced variant rearrangement in Ni–Mn–Ga single crystals with seven-layered martensitic structure. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 378, no. 1-2, pp. 399–402. DOI: [10.1016/j.msea.2003.10.365](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.365).
21. L'vov V.A., Glavatska N., Aaltio I., Söderberg O., Glavatsky I., Hannula S.-P. The role of anisotropic thermal expansion of shape memory alloys in their functional properties. *Acta materialia*, 2009, vol. 57, no. 18, pp. 5605–5612. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.07.058](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.058).
22. Lebedev A.B., Kustov S.B., Kardashev B.K. On internal-friction and young modulus defect during crystal deformation. *Fizika tverdogo tela*, 1992, vol. 34, no. 9, pp. 2915–2921.

## Influence of dislocation and twin structures on the mechanical characteristics of Ni–Mn–Ga alloys at ultrasonic frequencies

© 2022

**Vladimir V. Kaminskii**<sup>\*1</sup>, postgraduate student of the Institute of Advanced Data Transfer Systems

**Dmitriy A. Kalganov**<sup>2</sup>, graduate student of the Institute of Advanced Data Transfer Systems

**Ekaterina Podlesnov**<sup>3</sup>, postgraduate student of the Institute of Advanced Data Transfer Systems

**Alexey E. Romanov**<sup>4</sup>, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,

professor of the Institute of Advanced Data Transfer Systems

*ITMO University, Saint Petersburg (Russia)*

\*E-mail: kam-vladimiro@yandex.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4388-2459><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1986-3693><sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0520-9407><sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>

Received 06.05.2022

Accepted 16.06.2022

**Abstract:** Magnetic shape memory alloys are a specific subtype of shape memory materials. The magnetic deformation phenomenon causes the high research interest in these alloys. Thus, in one of the most promising alloys based on Ni–Mn–Ga, using a magnetic field, it is possible to achieve changes in a single crystal size by up to 10 % due to the reorientation of the magnetic field in magnetic domains. The high magnetic deformation is directly related to the high mobility of twin

boundaries separating two domains. In this work, the authors used a composite piezoelectric oscillator at a frequency of about 100 kHz to determine the influence of such defects as dislocations and twin boundaries on the mechanical characteristics of  $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{30}\text{Ga}_{21}$ . The authors investigated the features of temperature dependences of internal friction in the samples before and after deformation and provided the amplitude dependences of these characteristics. In the studied single-crystal martensitic phase, the transition from the tetragonal phase to the orthorhombic phase was detected at 235 K. In the Ni–Mn–Ga tetragonal phase, the formation of new defects contributes to the more pronounced and early onset of amplitude-dependent internal friction. At lower loads, the successive stages occur associated with the processes of dislocations and twin boundaries movements inside the Cottrell clouds, dislocations and twin boundaries movement outside the Cottrell clouds, and supposedly, the slowdown of dislocations and twin boundaries movement due to their interaction. As well as internal friction, the authors studied the change in Young's modulus. Its decrease at all temperatures is most pronounced in the samples with the defective structures. The study identified that in the orthorhombic phase, it is possible to observe the internal friction dependence on the deformation amplitude at a lower load due to an increase in the twin boundaries mobility with increasing temperature.

**Keywords:** magnetic shape memory; magnetic deformation; Young's modulus; internal friction; defects; dislocations; twins; Ni–Mn–Ga.

**Acknowledgements:** The reported study was funded by RFBR, project number 20-32-90195.

**For citation:** Kaminskii V.V., Kalganov D.A., Podlesnov E., Romanov A.E. Influence of dislocation and twin structures on the mechanical characteristics of Ni–Mn–Ga alloys at ultrasonic frequencies. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 28–36. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-28-36.