

Научная статья

УДК 669.24'74:538.91

Исследование предмартенситных явлений в сплавах NiMn, легированных титаном, алюминием, галлием

**Елена Сергеевна Белослудцева¹, Елена Борисовна Марченкова²,
Владимир Григорьевич Пушкин³, Алексей Николаевич Уксусников⁴**

^{1,2,3,4} Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет им. первого Президента
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ ebelosludceva@mail.ru

Аннотация. В работе исследованы предмартенситные явления в сплавах системы NiMn, легированные титаном, алюминием и галлием. Обнаружено, что вблизи температуры мартенситного превращения В2-решетка испытывает ряд аномальных явлений. Установлены мартенситные фазы в данных сплавах после термоупругого мартенситного превращения. Определены температуры Дебая и среднеквадратичные смещения атомов.

Ключевые слова: мартенситное превращение, предмартенситные явления, предпереходные явления, устойчивость решетки, аномальные явления, диффузные эффекты

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания (шифр «Структура») г. р. № АААА-А18-118020190116-6 и проекта РНФ № 15-12-10014.

Original article

Study of Premartensitic Phenomena in NiMn Alloys Doped with Titanium, Aluminum, Gallium

**Elena S. Belosludtseva¹, Elena B. Marchenkova²,
Vladimir G. Pushkin³, Aleksey N. Uxusnikov⁴**

^{1,2,3,4} M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

³ Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ ebelosludceva@mail.ru

Abstract. The work investigates pre-martensitic phenomena in alloys of the NiMn system doped with titanium, aluminum and gallium. It was found that near the temperature of martensitic transformation, the B2-lattice experiences a number of anomalous phenomena. The martensitic phases in these alloys after thermoelastic martensitic transformation have been established. Debye temperatures and root-mean-square displacements of atoms are determined.

Keywords: martensitic transformation, pre-martensitic phenomena, pre-transitional phenomena, lattice stability, anomalous phenomena, diffuse effects

Funding. The work was carried out within the framework of the state task (code “Structure”) of the year of birth No. AAAA18-118020190116-6 and the Russian Science Foundation project No. 15-12-10014.

Известно, что в преддверии мартенситных превращений, как перед прямым, так и перед обратным переходами, происходят непрерывные и обратимые изменения ряда физических свойств, устойчивости и тонкой структуры исходной аустенитной или мартенситной фаз [1]. В настоящей работе впервые были выполнены систематические комплексные исследования метастабильных сплавов с термоупругим мартенситным превращением в сплавах системы NiMn, легированные титаном, алюминием и галлием. Показано, что предпереходное состояние характеризуется относительным нарастанием амплитуды аномальных по температурной зависимости динамических и квазистатических смещений атомов, существенно отличающихся от характера атомных колебаний в обычных, не испытывающих мартенситного превращения металлических сплавах. Установлено, что возрастает интенсивность и регулярность твидового контраста (рис. 1, 3). Диффузные эффекты возникают за 100–150° перед началом мартенситного превращения и при охлаждении (приближении к температуре начала мартенситного превращения) их интенсивность и четкость особенно усиливается на тяжах типа $\langle 110 \rangle^*$ и $\langle 112 \rangle^*$ в положениях, близких $1/3\langle 110 \rangle^*$, $1/2\langle 110 \rangle^*$, $1/3\langle 112 \rangle^*$, $1/6\langle 110 \rangle^*$ (рис. 1–3).

Профили интенсивности диффузных эффектов (рис. 1, 2) были измерены при обработке изображений электронной дифракции от выбранного участка с помощью программы Digital Micrograph. Профили интенсивности рассчитаны с использованием функции Гаусса в рамках программы Origin. Анализ показывает, что типичные особенности наблюдаемого дифракционного твидового контраста и диффузного рассеяния электронов, т. е. их периодическое «повторение», регулярное затухание и усиление, позволяют описать их определенными спектрами поперечных и продольных волн колебаний в k -пространстве обратной решетки, которые характеризуются волной (k) и поляризацией ($e^{(k)}$) векторов и, соответственно, отождествить их с локализованными волнами атомных смещений в пространство кристалла, которые периодически искажают исходную кристаллическую решетку.

Исходя из рентгенографических данных в диапазоне температур (300–1100 К), можно выделить два этапа в непрерывно нарастающих внутри $B2$ -фазы предпереходных структурных изменений. Первый — начало развития предмартенситного состояния при снижении устойчивости $B2$ -решетки, характеризуемое возникновением ближнего порядка смещений атомов (БПС). При этом, начиная с определенной температуры ($T_{\text{БПС}}$), наблюдалось падение интенсивности линии 110_{B2} . При дальнейшем охлаждении происходит формирование промежуточных структур сдвига (ПСС), приводящее к уширению линии 110_{B2} ($T_{\text{ПСС}}$), и уже затем начинается собственно мартенситное превращение ниже температуры M_s . Эти три состояния в сплавах разделены по температуре.

Для получения более детальной информации о динамике кристаллической решетки были определены температуры Дебая Θ_D и среднеквадратичные смещения атомов $\langle U_s^2 \rangle_{\text{рент}}$ по температурным зависимостям интенсивностей брэгговских отражений. Установлено, что, начиная с определенной температуры, имеет место аномальное падение значений температуры Дебая Θ_D . Такое поведение Θ_D вызвано аномальным уменьшением сил межатомных связей в предмартенситном состоянии. При этом величины $\langle U_s^2 \rangle_{\text{рент}}$ с приближением к M_s превращения также аномально растут.

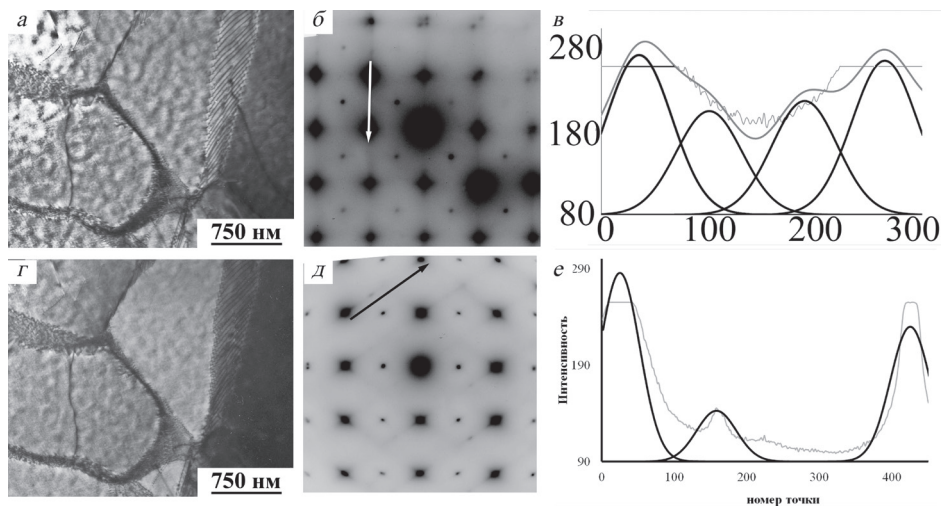


Рис. 1. Светло- (*a*) и темнопольное (*г*) изображения, микроэлектрограммы (*б* — ОЗ [001]; *д* — [110]) и графики сканирования интенсивностей диффузного рассеяния (*в*, *е*) сплавов Ni50Mn30Al20 (*a–г*) и Ni50Mn26Al24 (*д*, *е*)

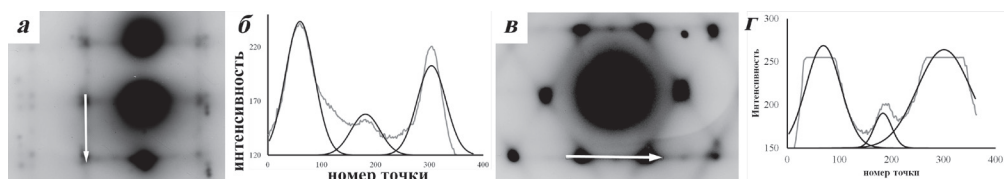


Рис. 2. Микроэлектрограммы (*a* — ОЗ [001], *в* — ОЗ [111]) и графики сканирования интенсивностей диффузного рассеяния (*б*, *г*) сплавов Ni50Mn30Ti20 (*a*, *б*) и Ni50Mn25Ti25 (*в*, *г*)

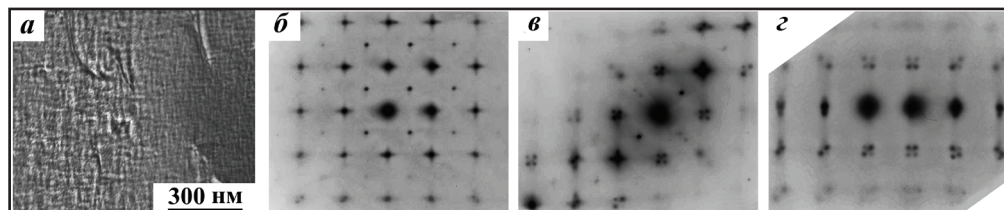


Рис. 3. Типичное электронномикроскопическое изображение (*a*) и картины микродифракции с осью зон [100] сплава Ni54Mn21Ga25 (*б–г*)

В соответствии с полученными данными в предмартенситном состоянии аустенит исследованных сплавов может быть описан ближним порядком атомных смещений по типу будущей мартенситной фазы в основном посредством коррелированных и сдвиговых смещений по системе $\{101\}\langle 101\rangle$ ОЦК с образованием локализованных сдвиговых наноструктур.

Образование мартенситных фаз 2М, 10М и 14М в исследованных сплавах также можно рассматривать как результат закономерного смещения плоскостей $\{110\}$ относительно друг друга в направлении вектора поляризации $[\bar{1}10]$ статической волны с длиной модуляции $\lambda = Nd_{\langle 110\rangle}$ (где $N = 4, 10, 14$). С учетом обнаруженных в преддверии ТМП предпереходных состояний последовательность структурных и фазовых превращений в исследуемых сплавах $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Me}_x$ может быть представлена следующей схемой (рис. 4).

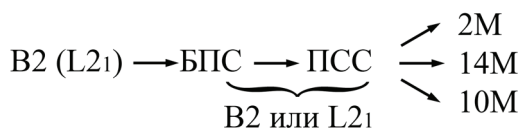


Рис. 4. Схема структурных и фазовых превращений в исследуемых сплавах $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Me}_x$

При этом динамические смещения имеют аномальную температурную зависимость характерных частот колебательного фононного спектра кристалла. Затем квазистатические смещения в виде длительно существующих локальных конфигураций смещенных атомов образуют ближний порядок смещений атомов. Структура сплавов в состоянии БПС определяется спектром коротковолновых смещений атомов. На электронно-микроскопических изображениях обнаруживается контраст типа твида от высокодисперстных образований или доменов размером $\sim 3\text{--}5$ нм. Полосы твида, как правило, ориентированы вдоль различных кристаллографических направлений — следов пересечения кристаллографических плоскостей типа $\{110\}$ с плоской поверхностью фольги. С ростом пространственных корреляций динамических смещений образуются локальные состояния в виде несовершенных длиннопериодных, соизмеримых, а часто и слабо несоизмеримых с исходной решеткой наноструктур [1].

Список источников

1. Пушин В. Г., Кондратьев В. В., Хачин В. Н. Предпереходные явления и мартенситные превращения. Екатеринбург : УрО РАН, 1998. 368 с

References

1. Pushin V. G., Kondratiev V. V., Khachin V. N. Pre-transition phenomena and martensitic transformations. Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 368 p