Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 396-403

ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРНЫХ АГРЕГАТОВ С ПЕНТАГОНАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ Ni₅₁Ti₄₉

Ф. М. Носков¹, Л. И. Квеглис^{1*}, М. Н. Волочаев², А. К. Абкарян¹, В. С. Жигалов²

¹Сибирский федеральный университет Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10 ²Институт физики им. Киренского СО РАН Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50 ^{*}E-mail: kveglis@list.ru

Исследование особенностей структурно-фазовых превращений в сплаве с эффектом памяти формы Ni₅₁Ti₄₉, происходящих при пластических деформациях, является актуальным в связи с широким использованием сплавов системы «никель-титан» при изготовлении разнообразных изделий ракетно-космической и авиационной техники. Проблема структурообразования в никелиде титана при пластической деформации является предметом широких дискуссий и нуждается в дополнительных исследованиях. Целью работы является исследование микроструктуры линзовидных кристаллов, возникающих при пластической деформации образцов Ni₅₁Ti₄₉.

Термически обработанные образцы сплава Ni₅₁Ti₄₉ подвергались статическому растяжению до разрыва. Растянутые образцы в области шейки утонялись и подготавливались с помощью ионного травления для исследования методами просвечивающей электронной микроскопии.

Обнаружены линзовидные кристаллы с многочисленными экстинкционными контурами. На картинах дифракции электронов от линзовидных кристаллов обнаружена система рефлексов, соответствующих фазе с пентагональной осью симметрии. В результате расшифровки дифракционной картины выявлены матричная фаза B2 с параметром 3,01 Å, фаза с ГЦК-решеткой с параметром 3,68 Å, а также система рефлексов от примитивной кубической решетки с параметром 2,13 Å.

На основании выполненного обзора по модульному представлению кристаллических структур предложена схема образования кластерного агрегата с пентагональной симметрией, позволяющая объяснить экспериментальные результаты. ОЦК-решетка может быть описана как система, состоящая из 6 неправильных октаэдров. ГЦК-решетка может быть представлена как комбинация одного правильного октаэдра, окруженного правильными тетраэдрами, связанными общими треугольными гранями.

В работе связываются десять рефлексов от фазы с пентагональной симметрией, соответствующих $d_{111} = 2,13$ Å ГЦК-решетки, с набором кристаллических симплексов, образующих икосаэдр. Пентагональные элементы, которые мы наблюдаем в эксперименте, состоят из тетраэдрических кристаллических симплексов ГЦК-решетки, которыми вследствие небольших смещений атомов формируется кластерный агрегат с пен тагональной симметрией. Продемонстрировано, как икосаэдрическая фаза с пентагональной симметрией, образованная из тетраэдрических симплексов ГЦК-решетки, может быть вписана в простой куб с соответствующими параметрами.

Представлены теоретические сведения, касающиеся особенности дифракционных методов исследования структуры, позволяющие описать наблюдаемые дифракционные картины, а также связать их с теоретическими представлениям, предложенными в рамках кластерных моделей.

Ключевые слова: никелид титана, просвечивающая электронная микроскопия, линзовидный кристалл, кластер, икосаэдр, пентагональная симметрия.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 396-403

FORMATION OF CLUSTER AGGREGATES WITH PENTAGONAL SYMMETRY IN PLASTICALLY DEFORMED SAMPLES Ni₅₁Ti₄₉

F. M. Noskov¹, L. I. Kveglis^{1*}, M. N. Volochaev², A. K. Abkaryan¹, V. S. Zhigalov²

¹Siberian Federal University
79/10, Svobodnyy Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
²Kirensky Institute of Physics SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
*E-mail: kveglis@list.ru

The research of features of structural and phase transformations in alloys with shape memory effect $Ni_{51}Ti_{49}$, occurring during plastic deformation is relevant in connection with the extensive use of alloys of nickel-titanium systems in the manufacture of various products of rocket-space and aviation technology. The problem of structure in NiTi during plastic deformation is the subject of a lot of debates and needs further research. The aim is to study the microstructure of lenticular crystals, appearing as a result of plastic deformation $Ni_{51}Ti_{49}$ samples.

Heat-treated alloy samples $Ni_{51}Ti_{49}$ were static stretched before breaking. The stretched samples were thinned at the neck region and prepared through ion etching for study by transmission electron microscopy.

The lenticular crystals with numerous extinction contours were detected. In the electron diffraction patterns from crystals of lenticular system reflexes found appropriate phase with pentagonal symmetry axis. As a result of the decryption of the diffraction pattern revealed B2 matrix phase with parameter 3.01 Å, phase fcc with parameter 3.68 Å, as well as a system of reflexes of the primitive cubic lattice with a parameter of 2.13 Å.

Based on the review performed by the modular representation of the crystal structures of the scheme of formation of the cluster unit with pentagonal symmetry, can explain the experimental results. BCC lattice can be described as a system consisting of 6 wrong octahedra. FCC lattice can be represented as a combination of a regular octahedron surrounded by a regular tetrahedron, linked by common triangular faces.

The ten reflexes of phase with pentagonal symmetry correspond to $d_{111} = 2.13$ Å FCC lattice. 20 tetrahedrons from FCC lattice are forming an icosahedron due to small displacements of atoms It is demonstrated how icosahedral phase with pentagonal symmetry formed from tetrahedral simplices FCC lattice can be inscribed in a simple cube with the appropriate parameters.

Theoretical information on features of the diffraction methods of the structure investigation was considered, which allowed describing the observed diffraction patterns, as well as linking them with the theoretical concepts proposed in the framework of the cluster model.

Keywords: titanium nickel alloy, transmission electron microscopy, lenticular crystal cluster, the icosahedron, pentagonal symmetry.

Введение. Известно [1], что сплавы системы «никельтитан», обладающие эффектом памяти формы, широко применяются при изготовлении разнообразных изделий ракетно-космической и авиационной техники. В связи с этим актуальным является исследование особенностей структурно-фазовых превращений в сплавах с эффектом памяти формы Ni₅₁Ti₄₉, происходящих при пластических деформациях.

Многие исследователи [2–5] наблюдали возникновение монокристаллов линзовидной формы, которые содержали большое количество изгибных экстинкционных контуров, свидетельствующих о значительной кривизне кристаллической решетки, возникающей из-за концентрации напряжений в локализованных областях [6].

В нашей работе [7] в образцах сплава Ni₅₁Ti₄₉, подвергнутых растяжению, обнаружены линзовидные кристаллы, отличающиеся составом и структурой от структуры матричного сплава. Сделанные оценки внутренних напряжений показывают, что в зонах локализации деформации могут создаваться напряжения, превышающие предел прочности для всего материала [7].

В работе была показана возможность появления ГЦК-решетки в массивных образцах никелида титана после растяжения [8]. На основании расшифровки дифракционных картин нами показано, что процесс мартенситного превращения структуры В2 может проходить по схеме Курдюмова–Закса. Описание превращений при помощи моделей относительных смещений плоских сеток затруднено в связи с различными обозначениями атомных плоскостей и векторов прямой и обратной решеток для структур с различной симметрией.

Одной из активно развивающихся концепций структурообразования является концепция кластерного моделирования трехмерных структур. В этом методе полиморфное мартенситное превращение описывается не как относительное смешение плоских атомных сеток, а как реконструкция трехмерных координационных полиэдров, составляющих кристаллические структуры фаз-партнеров по фазовому превращению с сохранением их связности [9-12]. Метод основан на представлении каждого структурного состояния в виде комбинации элементарных кристаллических кластеров. Кластер – это система атомов, (частиц) свойства которой зависит от их числа [13]. Кластеры собираются на основе кристаллических модулей и/или симплексов. Кристаллический модуль - однозначно выделенная только по химическим связям в структуре кристаллов пустота в виде полиэдра, заполняющего при параллельном переносе все пространство. Модуль может быть образован несколькими симплексами. Симплекс - полиэдр, образованный атомами структуры, лежащими на поверхности пустой сферы, ребрами которого являются кратчайшие межатомные расстояния (химические связи) [10]. Таким образом, кластерные агрегаты – это комбинация кластеров, порожденных симплексами и/или модулями различных кристаллических решеток.

Нам удалось показать возможность существования фазы с ГЦК-решеткой в никелиде титана [14] при помощи кластерного моделирования. С помощью кластерного моделирования предложена схема мартенситных превращений в никелиде титана из структуры В2 (ОЦК-решетка) в структуру В19' (ГПУ-решетка) через промежуточную фазу с ГЦК-решеткой.

В работе [15] предложена модель кристаллической структуры мартенситной *R*-фазы в системе Ni–Ti, основанная на кластерном подходе: ромбододекаэдр исходной ОЦК-структуры превращается в конечный кубооктаэдр через промежуточные конфигурации

кластера особой фазы и икосаэдра. Автор [16] допускает, что наблюдаемые структуры с пентагональной симметрией на самом деле периодические и обладают не икосаэдрической, а близкой к икосаэдрической кубической симметрией. В [17] показано, что повышение точечной симметрии кристалла может быть вызвано несоразмерной деформацией исходной периодической структуры, обладающей более низкой точечной симметрией. Несоразмерная деформация приводит к атомным смещениям, в работах В. Г. Пушина, например [18], показана возможность значительных атомных смещений, превышающих несколько десятых долей ангстрема, при мартенситных превращениях в никелиде титана.

Проблема структурообразования в никелиде титана при пластической деформации является предметом широких дискуссий и нуждается в дополнительных исследованиях.

Цель работы – исследование микроструктуры линзовидных кристаллов, возникающих при пластической деформации образцов Ni₅₁Ti₄₉.

Задачи работы:

1. Методами электронной микроскопии исследовать микроструктуру утоненных массивных образцов сплава Ni₅₁Ti₄₉, подвергнутых растягивающей нагрузке на испытательной машине.

2. Методами дифракции электронов исследовать структурно-фазовые превращения при формировании линзовидных кристаллов в области шейки растянутого образца.

3. Объяснить с помощью представлений о кристаллических модулях возможности формирования в зонах локализации деформации кластерных агрегатов с пентагональной симметрией.

Образцы и методы. Термически обработанные образцы сплава Ni₅₁Ti₄₉ подвергались статическому растяжению до разрыва на испытательной машине WDW-5E. Для исследования образцов методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопах Hitachi 7700 и JEOL-2100 подготавливали образцы с помощью ионного травления на установке PIPS (Gatan). Подробнее методика изложена в [7].

Экспериментальные результаты. На рис. 1. приведено электронно-микроскопическое изображение утоненного образца Ni₅₁Ti₄₉, растянутого до разрыва в области шейки. Наблюдается линзовидный кристалл с многочисленными экстинкционными контурами внутри [7].

Картина дифракции электронов, полученная от линзовидного кристалла, показанного на рис. 1, приведена на рис. 2. Особенностью дифракционной картины является наличие пентагональной симметрии, о которой свидетельствуют десять рефлексов, расположенных с шагом 36° на наиболее интенсивном дифракционном кольце (рис. 2, *a*). Схема расшифровки показана на рис. 2, *б*, а данные сведены в таблицу.

При составлении таблицы исходили из того, что параметр решетки В2 a = 3,01 Å [19]. Значение d_{110} ячейки В2, равной $d_{110} = 3,01/\sqrt{2} = 2,13$ Å [20], присвоили линии 4 (см. рис. 2, *а*, таблицу). Исходя из этой величины, были получены остальные линии ОЦК-решетки В2, соответствующие исходной матрице, окружающей линзовидный кристалл (см. таблицу).

В нашей работе [14] было показано, что при мартенситном переходе в никелиде титана возможно формирование фазы с ГЦК-решеткой, причем рефлекс [110]_{ОЦК} близок к рефлексу [111]_{ГЦК}. Исходя из этой предпосылки, мы присвоили индекс [111]_{ГЦК} линии 4 и, сделав необходимые расчеты, выявили рефлексы ГЦК-решетки (см. таблицу) с параметром a = 3,68 Å. Оставшиеся линии расшифровывались как индексы примитивной кубической решетки с параметром a = 2,13 Å, причем индекс [100]_{ПК} оказался также лежащим на линии 4 (основном дифракционном кольце).

Обсуждение результатов. У. Пирсон [9] описывает структуру ОЦК-решетки (рис. 3) как систему, состоящую из 6 неправильных октаэдров (рис. 3, *a*). Согласно [10] ГЦК-решетка может быть представлена как комбинация одного правильного октаэдра, окруженного правильными тетраэдрами, связанными общими треугольными гранями (рис. 3, *б*).



Рис. 1. ПЭМ-изображение линзовидного кристалла, выросшего в зоне локализации напряжений деформированного образца Ni₅₁Ti₄₉

Fig. 1. TEM image of lens-shaped crystal grown in the zone of electric porential location of deformed sample $Ni_{51}Ti_{49}$



Рис. 2. Дифракционная картина, полученная от линзовидного кристалла, представленного на рис. 1: *а* – десять рефлексов, расположенных с шагом 36° на дифракционном кольце с наибольшей интенсивностью; *б* – схема расшифровки дифракционной картины, представленная в таблице

Fig. 2. Diffraction pattern received from lens-shaped crystal, shown on fig. 1: a – ten reflexes situated in increments of 36° on the diffraction circle with the utmost intensity; b – scheme of decipher of diffraction pattern shown on table

Номер линии	Межплоскостное расстояние <i>d</i> , Å	Объемно-центрированная кубическая решетка	Гранецентрированная кубическая решетка	Примитивная кубическая решетка
1	3,44	¹ / ₂ ¹ / ₂ ¹ / ₂ *(+0,04)		
2	2,99	100* (+0,02)		
3	2,53		110*(+0,07)	1/2 1/2 1/2*(-0,07)
4	2,13	110	111	100(-0,01)
5	1,86		200(-0,02)	
6	1,71	111*(+0,03)		
7	1,63		210*(-0,02)	
8	1,50	200(+0,01)	211*(0,00)	110(+0,01)
9	1,37	210*(-0,02)		
10	1,31		220(+0,01)	
11	1,25			111(-0,02)
12	1,22	211(+0,01)	221*(+0,01)	
13	1,12		311(-0,01)	
14	1,09		222(-0,03)	200(-0,02)
15	1,03	220(+0,03)		
16	0,98	300*(+0,02)		
17	0,96			210(-0,01)
18	0,94	310(+0,01)		
19	0,91		400(+0,01)	
20	0,87			211(0,00)
21	0,84	222(+0,03)	331(0,00)	
22	0,83		420(-0,01)	

Результаты расшифровки дифракционной картины, приведенной на рис. 2

Окончание таблицы

Номер линии	Межплоскостное расстояние d, Å	Объемно-центрированная кубическая решетка	Гранецентрированная кубическая решетка	Примитивная кубическая решетка
23	0,79	321(+0,01)		
24	0,75	400(0,00)	422(0,00)	220(0,00)
25	0,71	411(0,00)	511(0,00)	221(0,00)
26	0,68	420(-0,01)		310(-0,01)
27	0,65	332(-0,01)	440(0,00)	311(+0,01)
28	0,62	422(-0,01)	531(0,00)	
29	0,60	511*(-0,02)	442(+0,01)	

Примечания: 1. Числа в скобках показывают, сколько надо добавить/отнять от наших экспериментальных данных до идеального расчетного показателя.

2. Звездочками помечены сверхструктурные рефлексы атомно-упорядоченных фаз.



Рис. 3. Модульное представление кристаллических структур: *a* – октаэдрические модули ОЦК-решетки [9]; *б* – ромбоэдрический модуль ГЦК-решетки [10], состоящий из тетраэдрических и октаэдрического симплексов; *в* – кластерный агрегат, образованный связанными друг с другом кристаллическими модулями ОЦК-решетки с октаэдрическими и тетраэдрическими симплексами ГЦК-решетки

Fig. 3. Chinese representation of crystal structures: *a* – octahedral module of OCK-grid [9]; *b* – rhombohedral module of GCK-grid [10] consisting of tetrahedral and octahedral symplexes; *c* – cluster component made of connected crystal modules of OCK-grid with tetrahedral and octahedral symplexes of GCK-grid

Мы связываем десять рефлексов, расположенных на кольце 4 (см. рис. 2), соответствующих $d_{111} = 2,13$ Å ГЦК-решетки, с набором кристаллических симплесов, образующих икосаэдр. Длина ребра тетраэдрического кристаллического симплекса (которая всегда совпадает с плоскостью типа (111)_{ГЦК}) в ГЦК-решетке с параметром 3,68 Å равна $d_{220} = 1,31$ Å. По нашей гипотезе икосаэдрические элементы, которые мы наблюдаем в эксперименте, состоят из тетраэдрических кристаллических симплесов ГЦК-решетки (рис. 3, *в*). Здесь атомы смещаются (например, как показано стрелкой на рис. 3, *в*), формируя кластерный агрегат с пентагональной симметрией.

Из таблицы видно, что наряду с рефлексами от фаз с ОЦК- и ГЦК-решетками мы обнаружили наличие системы рефлексов, соответствующих примитивной кубической решетке, параметр которой равен 2,12 Å. Это число можно получить, если в куб с указанным параметром примитивной решетки, изображенным на рис. 4, вписать икосаэдр с ребром (расстояние 1-2 и эквивалентные ему на рис. 4), равным расстоянию $d_{220} = 1,31$ Å ГЦК-решетки (см. таблицу). На рис. 4 продемонстрировано, как икосаэдр вписывается в куб. Для этого ребра типа 1-2, 3-4 или 7-8 располагаются в гранях куба. В икосаэдре все ребра попарно параллельны, каждая пара образует золотой прямоугольник, т. е. прямоугольник с отношением ребер, равным 1,618 [21]. Золотой прямоугольник выделен на рис. 4, *б* как прямоугольник 3-4-5-6. И действительно, 1,31 Å (ребро икосаэдра) умноженное на отношение золотого сечения 1,618, даст 2,12 Å, т. е. d_{100} примитивного куба, показанного на рис. 4 (см. также таблицу).

Следует заметить, что в вершинах примитивного куба на рис. 4 атомы отсутствуют. Согласно [9], решетка с кубической симметрией может и не содержать атомы в вершинах куба. Поэтому наблюдаемые нами наборы рефлексов кубической решетки будут представлять собой экстрарефлексы, которые по своей природе отличаются от сверхструктурных рефлексов, вызванных атомным упорядочением.



Рис. 4. Схема, демонстрирующая связь икосаэдра с примитивной кубической решеткой: *a* – ребра икосаэдра типа 1-2, 3-4, 7-8 находятся в ортогональном положении в соответствующих плоскостях куба; *б* – золотой прямоугольник 3-4-5-6, помеченный пунктирной линией, находится в плоскости (200) куба

Fig. 4. Diagram shown connection of icosahedron with primitive cubic lattice: a - bonds of icosahedron, sort of 1-2, 3-4, 7-8, located in the orthogonal position in the relevant cube flatness; b - golden rectangle 3-4-5-6 marked by dashed line is located in the cube flatness (200)

В работе [22] показано, что появление экстрарефлексов может быть связано, с одной стороны, с растяжением узлов обратной решетки, а с другой – с эффектами двойной дифракции. Расшифровка структуры квазикристаллов по их дифракционной картине трудна и всегда требует дополнительных допущений о взаимном расположении атомов. Авторы [17] утверждают, что структура икосаэдрического квазикристалла может быть рассмотрена как результат искажения ГЦК-решетки.

В книге [23] указывается, что каждый элементарный объем излучает рассеянный волновой пакет с фазовым множителем $\exp(-i\Delta k \times r_i)$, где r_i координата элементарного объема, а Δk – это изменение волнового вектора k в обратном пространстве, $\Delta k \equiv k - k_0$, где k₀ – волновой вектор падающей электронной волны, а *k* – волновой вектор рассеянной электронной волны. Авторы доказывают, что Фурье-образ потенциала, «видимого» падающим электроном при его прохождении через рассеиватель, прямо пропорционален потенциалу всего кристалла. Этот кластерный агрегат с пентагональной симметрией может не иметь дальнего порядка, однако Фурье-преобразование от деталей такого кластерного агрегата, когерентно ориентированных в объеме исследуемого объекта, может создать картину реально существующего кристалла с дальнем порядком, что и наблюдается на рис. 2.

Из геометрии известно, что в двойственный к икосаэдру многогранник – додекаэдр можно вписать пять кубов. На дифракционной картине наблюдается симметрия 5-го порядка (рис. 2), т. е. возможно одновременное сосуществование в объеме линзовидного кристалла пяти ориентаций кубической решетки. На дифракционной картине видны не точечные рефлексы, как это представлено в работе [24], а дуги с углами примерно 14°–17°. Длина каждой дуги связана с разориентацией тетраэдрических симплексов, составляющих икосаэдр. Фурье-образ с пентагональной осью симметрии может быть получен в двух случаях. Первый случай, если квазикристалл сформирован как единая икосаэдрическая фаза, как это представлено в работе [24]. В этом случае должна быть система точечных рефлексов, выстроенная по правилу Фибоначчи вдоль каждого выбранного направления. В нашем эксперименте это не наблюдается (рис. 2, а). Второй случай, если имеется система связанных между собой кластеров, имеющих ближний порядок и заполняющих некоторый объем [23]. В таком случае разориентации между кластерными агрегатами создадут дуговые рефлексы на электронограмме, которая является Фурье-образом от системы наблюдаемых кластерных агрегатов.

Пентагональная симметрия во втором случае является результатом почти когерентных равновероятных пяти ориентаций кластерных агрегатов, состоящих из связанных между собой кристаллических модулей и симплексов ОЦК- и ГЦК-решеток. Подобная схема связанных икосаэдрического кластера и кристаллических модулей ГЦК-решетки была предложена в работе [25].

Таким образом, наблюдаемая нами картина дифракции от линзовидного кристалла может быть проинтерпретирована как дифракция от когерентно ориентированной системы кластерных агрегатов, формирующих элементы трехмерной икосаэдрической структуры (состоящей из тетраэдрически плотноупакованных кристаллических симплексов), встроенных в матрицу с кубической симметрией.

Заключение:

1. Методами электронной микроскопии исследована микроструктура утоненных массивных образцов сплава Ni₅₁Ti₄₉, подвергнутых растягивающей нагрузке на испытательной машине. Обнаружены линзовидные кристаллы с многочисленными экстинкционными контурами.

2. На основании расшифровки картин дифракции электронов от линзовидных кристаллов обнаружены системы рефлексов, соответствующих фазе, обладающей пентагональной осью симметрии.

3. С помощью представлений о кристаллических модулях предложено объяснение возможности формирования в зонах локализации деформации кластерных агрегатов с пентагональной симметрией.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудника лаборатории ИРГЕТАС Восточно-Казахстанского государственного технического университета А. В. Джес за помощь в проведении эксперимента.

Acknowledgments. The authors are grateful to A. B. Dzhes, the laboratory worker of the Laboratory IRGETAS of East Kazakhstan State Technical University, for help with the experiment.

Библиографические ссылки

1. Халов М. О. Перспективы применения сплавов с памятью на основе никелида титана в устройствах аэрокосмического назначения [Электронный ресурс] // Труды МАИ : электрон. жур. 2012. № 55. URL: www. mai.ru/science/trudy/.

2. Kolosov V. Yu., Tholen A. R. Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films // Acta Materialia. 2000. Vol. 48. P. 1829.

3. Багмут А. Г. Электронная микроскопия пленок, осажденных лазерным испарением. Харьков : Підручник НТУ. ХПІ, 2014. 304 с.

4. Квеглис Л. И. Структурообразование в аморфных и нанокристаллических пленках сплавов на основе переходных металлов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Красноярск : КГТУ, 2005. 280 с.

5. Bolotov I. E., Kolosov V. Yu. Electron microscope investigation of crystals based on bend-contour arrangement. I. Relationship between bend-contour arrangement and bend geometry // Physica Status Solidi. 1982. Vol. (A) 69. P. 85–96.

6. Коротаев А. Д., Тюменцев А. Н., Суховаров В. Ф. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. Новосибирск : Наука, 1989. 210 с.

7. Особенности формирования линзовидных кристаллов при мартенситных превращениях в никелиде титана / А. В. Джес [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13, № 1. С. 96–104.

8. Особенности мартенситного превращения в никелиде титана / Р. Б. Абылкалыкова [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 11. С. 1642– 1644.

9. Пирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. М. : Мир, 1977. Т. 2. 472 с.

10. Бульёнков Н. А., Тытик Д. Л. Модульный дизайн икосаэдрических металлических кластеров // Известия АН. Серия химическая. 2001. № 1. С. 1.

11. Крапошин В. С., Талис А. Л. Кристаллография и вещество // Природа. 2014. № 11. С. 3–15.

12. Крапошин В. С., Талис А. Л. Комбинаторика и прочность стали // Природа. 2014. № 12. С. 3–12.

13. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Свойства кластерных ионов // УФН. 1989. Т. 159, № 1. С. 45–81.

14. Мартенситные превращения в никелиде титана через промежуточную фазу с ГЦК-решеткой / Л. И. Квеглис [и др.] // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19, № 2. С. 100–107.

15. Крапошин В. С., Нгуен В. Т. Модель кристаллической структуры *R*-мартенсита в сплавах с эффектом памяти формы на основе NiTi // Наука и образование : электрон. науч.-техн. изд-е. 2007. № 6. С. 2.

16. Дмитриенко В. Е. $Al_{86}Mn_{14}$ – квазикристалл или кубический кристалл? // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С.31–34.

17. Чижиков В. А. Квазикристалл как несоразмерная кристаллическая фаза // Рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов : материалы IV национальной конф. РСНЭ–2003 (17–22 нояб. 2003, г. Москва) / ИК РАН. 2003. 553 с.

18. Пушин В. Г., Кондратьев В. В., Хачин В. Н. Предпереходные явления и мартенситные превращения / РАН. Ур. отд-ние ; Ин-т физики металлов. Сиб. отд-ние ; Конструкт.-технол. ин-т «РИТЦ». Екатеринбург : УрО РАН, 1998. 367 с.

19. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука [и др.] / пер. с япон. М. : Металлургия, 1990. 224 с.

20. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов. 3-е изд. доп. и перераб. М. : МИСИС, 1994. 328 с.

21. Крапошин В. С. Золотое сечение в структуре металлов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 8. С. 3–10.

22. Матутес Х. А., Хатанова Н. А. Особенности дифракции электронов на тонких пластинах ε-мартенсита // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1982. Т. 23, № 3. С. 64–66.

23. Фульц Б., Хау Дж. М. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов / пер. с англ. В. И. Даниленко ; под ред. А. В. Мохова. М. : Техносфера, 2011. 903 с.

24. Shechtman D. The Icosahedral Quasiperiodic Phase // Physica Scripta. 1988. Vol. 23. P. 49–53.

25. Квеглис Л. И., Жарков С. М., Староверова И. В. Структурная самоорганизация и формирование ПМА в нанокристаллических плёнках Co₅₀Pd₅₀ // ФТТ. 2001. Т. 43, № 8. С. 1482–1486.

References

1. Halov M. O. [Prospects of application memory alloys based on nickel-titanium in aerospace devices]. *Elektronnyy zhurnal Trudy MAI*. 2012, No. 55 (In Russ.). Available at: www.mai.ru/science/trudy/ (accessed 27.10.2016).

2. Kolosov V. Yu., Tholen A. R. Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films. *Acta Materialia*. 2000, Vol. 48, P. 1829. 3. Bagmut A. G. *Jelektronnaja mikroskopija plenok, osazhdennykh lazernym ispareniem* [Electron microscopy of films deposited by laser evaporation]. Har'kov, Pidruchnik NTU. HPI, 2014, 304 p. (In Russ.).

4. Kveglis L. I. Strukturoobrazovanie v amorfnykh i nanokristallicheskikh plenkakh splavov na osnove perehodnykh metallov. Diss. Dokt. fiz.-mat. Nauk [Gelation in amorphous and nanocrystalline films based on transition metal alloys. Dr. phys. and Mathem. sci. diss.]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 2005, 280 p. (In Russ.)

5. Bolotov I. E., Kolosov V. Yu. Electron microscope investigation of crystals based on bend-contour arrangement. I. Relationship between bend-contour arrangement and bend geometry. *Physica Status Solidi*. 1982, Vol. (A) 69, P. 85–96.

6. Korotaev A. D., Tjumencev A. N., Suhovarov V. F. *Dispersionnoe uprochnenie tugoplavkikh metallov* [Dispersion hardening of refractory metals]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 210 p. (In Russ.).

7. Dzhes A. V., Noskov F. M., Kveglis L. I., Volochaev M. N., Tazhibaeva G. B. [Features of formation of lenticular crystals with martensitic transformations in NiTi]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2016, Vol. 13, No. 1, P. 96–104 (In Russ.).

8. Abylkalykova R. B., Tazhibaeva G. B., Noskov F. M., Kveglis L. I. [Features of martensitic transformation in NiTi]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 2009, Vol. 73, No. 11, P. 1642–1644 (In Russ.).

9. Pirson U. *Kristallokhimiya i fizika metallov i splavov* [Crystal chemistry and physics of metals and alloys]. Moscow, Mir Publ., 1977, Vol. 2, 472 p.

10. Bul'enkov N. A., Tytik D. L. [The modular design of icosahedral metal clusters]. *Izvestiya AN. Seriya khimicheskaya.* 2001, No. 1, P. 1 (In Russ.).

11. Kraposhin V. S., Talis A. L. [Crystallography and substance]. *Priroda*. 2014, No. 11, P. 3–15 (In Russ.).

12. Kraposhin V. S., Talis A. L. [Combinatorics and strength of steel]. *Priroda*. 2014, No. 12, P. 3–12 (In Russ.).

13. Eleckij A. V., Smirnov B. M. [Properties of cluster ions]. *UFN*. 1989, Vol. 159, No. 1, P. 45–81 (In Russ.).

14. Kveglis L. I., Noskov F. M., Volochaev M. N., Dzhes A. V. [Martensitic transformations in NiTi through an intermediate phase with fcc]. *Fizicheskaya mezo-mekhanika*. 2016, Vol. 19, No. 2, P. 100–107 (In Russ.).

15. Kraposhin V. S., Nguen V. T. [Crystal structure model R-martensite in alloys with shape memory effect based on NiTi]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie.* 2007, No. 6, P. 2 (In Russ.).

16. Dmitrienko B. E. $[Al_{86}Mn_{14} - quasicrystal or a cubic crystal?]$. *Pis'ma v ZhETF*. 1987, Vol. 45, P. 31–34 (In Russ.).

17. Chizhikov V. A. [Quasicrystal how incommensurate crystal phase]. *Rentgenovskoe, sinkhrotronnoe izlucheniya, neytrony i elektrony dlya issledovaniya nanosistem i materialov : materialy IV Natsional'noy konf. RSNE-2003* [The X-ray synchrotron radiation, neutrons and electrons for studies of nanosystems and materials: Materials of the IV National Conf. RSNE-2003]. Moscow, 2003, 553 p. (In Russ.).

18. Pushin V. G., Kondrat'ev V. V., Hachin V. N. *Predperekhodnye yavleniya i martensitnye prevrashche-niya* [Pretransitional phenomena and martensitic transformations]. Ekaterinburg, RAN. Ur. otd-nie. In-t fiziki metallov, Sib. otd-nie. Konstrukt.-tehnol. in-t "RITC" Publ., 1998, 367 p.

19. Oocuka K., Simidzu K., Sudzuki Ju. *Splavy s effektom pamyati formy* [Alloys with shape memory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 224 p.

20. Gorelik S. S., Skakov Ju. A., Rastorguev L. N. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 1994, 328 p.

21. Kraposhin V. S. [The Golden Ratio in the metal structure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2005, No. 8, P. 3–10 (In Russ.).

22. Matutes X. A., Hatanova N. A. [Features of diffraction of electrons on thin plates of ε-martensite]. *Bectn. Mosk. un-ta. Cep. 3. Fizika. Astronomiya.* 1982, Vol. 23, No. 3, P. 64–66 (In Russ.).

23. Ful'c B., Hau Dzh. M. *Prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya i difraktometriya materialov* [Transmission electron microscopy and diffraction materials]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2011, 903p.

24. Shechtman D. The Icosahedral Quasiperiodic Phase. *Physica Scripta*. 1988, Vol. 23, P. 49–53.

25. Kveglis L. I., Zharkov S. M., Staroverova I. V. [The structural self-organization and formation of PMA in nanocrystalline films $Co_{50}Pd_{50}$]. *FTT*. 2001, Vol. 43, No 8, P. 1482–1486 (In Russ.).

© Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Волочаев М. Н., Абкарян А. К., Жигалов В. С., 2017