

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ $Ti_{41,5}Zr_{41,5}Ni_{17}$ И $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**В.М. Ажжажа**, С.Д. Лавриненко, Ю.Ф. Лонин, Н.Н. Пилипенко, Б.В. Серета,  
С.В. Крячко\*, С.В. Малыхин\*, А.Т. Пугачёв\*, М.В. Решетняк\*

*Институт физики твёрдого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,  
Харьков, Украина*

*E-mail: Azhazha@kipt.kharkov.ua;*

*\*Национальный технический университет*

*«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина*

*E-mail: Malykhin@kpi.kharkov.ua, тел. +38(057)707-68-31*

Методом дифракции рентгеновских волн исследовано влияние облучения потоками рентгеновских квантов с энергией  $\leq 1$  МэВ и дозой до  $10^4$  рад на фазовую и структурную стабильности икосаэдрической квазикристаллической фазы (*i*-фаза) и родственных к ней фаз кристаллов-аппроксимантов в лентах состава  $Ti_{41,5}Zr_{41,5}Ni_{17}$  и  $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$ , полученных скоростной закалкой.

### ВВЕДЕНИЕ

Квазикристаллы представляют собой новый класс твёрдых тел, структура которых характеризуется наличием дальнего порядка при отсутствии трансляционной инвариантности [1, 2]. Симметрия икосаэдрических квазикристаллов характеризуется наличием оси 5 порядка наряду с осями 2 и 3 порядков. Считают, что необычность структуры квазикристаллов обуславливает ряд необычных свойств [1], и, в частности, предполагается повышенная радиационная стойкость [3].

Изучение поведения квазикристаллов в условиях повышенной радиации имеет, несомненно, повышенный практический интерес. Однако следует отметить, что данное направление исследований не носит в настоящее время системного характера. В отдельных работах было установлено, что облучение ионами средних масс до доз  $\leq 10^{13}$  см<sup>-2</sup> икосаэдрического квазикристалла системы Al-Cu-Fe не вызывает превращения его в какие-либо кристаллические фазы, но при этом отмечают совершенствование исходной структуры. Об этом свидетельствуют уменьшение ширины дифракционных максимумов и увеличение значения электрического сопротивления [4, 5]. В работе [6] установлено, что при облучении квазикристаллической икосаэдрической фазы системы Zr-Ti-Ni-Cu ионами  $Kg^+$  с энергией 300 МэВ структура фазы также не изменяется. При бомбардировке более тяжёлыми ионами  $Au^+$  ( $E \approx 593$  МэВ) наблюдается аморфизация исходной квазикристаллической фазы. Зависимость стимулированных радиационных изменений от условий облучения ионами  $Ag^+$  ( $E = 120$  кэВ) и электронами ( $E = 1$  МэВ) изучена в работе [7]. Установлено, что при  $T < 400$  К наблюдается превращение  $Al_{62}Cu_{25,5}Fe_{12,5}$  икосаэдрической фазы в кристаллическое состояние, при  $T > 400$  К квазикристаллическая фаза остаётся стабильной, но возможно изменение совершенства её структуры. При  $T > 550 \dots 600$  К отмечается отжиг планарных дефектов. Эффекты накопления структурных вакансий при электронном облучении ико-

саэдрических  $Mg_{26}Zn_{64}Ho_{10}$  и  $Al_{70,2}Pd_{21,3}Mn_{8,5}$  исследованы в [8], и тем же методом исследовано формирование вакансий при тепловом воздействии. Показано, что при  $T > 720$  К вакансии накапливаются с энтальпией образования 1,2 эВ. Как один из возможных механизмов дефектообразования рассматривают «осаждение энергии в виде электронных возбуждений» [4].

Действительно, распад рентгеновских электронных возбуждений, локализованных около точечных дефектов, примесных атомов, дислокаций либо вблизи поверхностных дефектов в кристаллах может приводить к образованию новых дефектов или к преобразованию уже имеющихся [9]. Этот механизм наиболее вероятен в полупроводниках и диэлектриках и известен как механизм Варли [9, 10]. Квазикристаллы по своему электронному строению близки к полупроводникам [1], поэтому в них также предполагается возможность образования радиационных дефектов по аналогичному механизму.

Поэтому целью данной работы являлось изучение изменения характеристик структуры быстрозакаленных лент из сплавов  $Ti_{41,5}Zr_{41,5}Ni_{17}$  и  $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$ , подвергнутых облучению большими потоками тормозного рентгеновского излучения.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы исследования представляли собой ленты толщиной 20...50 мкм, полученные способом скоростной закалки. Подробное описание процедуры приготовления лент дано в [11, 12]. В предыдущих работах были уточнены параметры синтеза квазикристаллической фазы в системе Ti-Zr-Ni. Для однофазных образцов выполнена аттестация структуры и свойств. Исследованы стабильность, структура и субструктура, остаточные внутренние напряжения, изучены отдельные физические свойства [13-19].

Для облучения образцов потоками рентгеновских квантов использовалась установка ТЕМП-А

ННЦ ХФТИ, энергетической основой которой является импульсный ускоритель релятивистских электронов. Энергия электронов  $E$  варьировалась в пределах 0,5...1 МэВ. Величина электронного тока составляла  $I \approx 4$  кА. Экспозиционную дозу  $D_{\text{экс}}$  изменяли от 2000 до 10000 рад. Структуру образцов исследовали рентгенодифрактометрически. Идентификацию фаз и индентификацию квазикристаллической фазы проводили в соответствии с методикой J.W. Cahn в двухиндексном обозначении (N, M) [20, 21]. Для характеристики квазикристаллической фазы использовали параметр квазикристалличности  $a_q$ , величина которого связана с модулем дифракционного вектора  $Q_{\perp}$  в физическом (параллельном) пространстве соотношением

$$Q_{\perp} = \frac{4\pi \sin \vartheta}{\lambda} = \frac{\pi}{a_q} \sqrt{\frac{N + M\tau}{2 + \tau}},$$

где  $\tau = 1,618034\dots$  - иррациональное число, так называемое «золотое сечение». Напомним, что полный дифракционный вектор для квазикристаллов является шестимерным и складывается из двух трехмерных:  $\vec{Q}_{6D} = \vec{Q}_{II} + \vec{Q}_{\perp}$ . Последнее слагаемое ( $Q_{\perp}$ ) представляет собой составляющую в дополнительном (перпендикулярном) пространстве.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали результаты предыдущих исследований, образцы состава  $\text{Ti}_{41,5}\text{Zr}_{41,5}\text{Ni}_{17}$ , полученные при линейных скоростях закалочного диска от 15 до 25 м·с<sup>-1</sup>, в исходном состоянии содержат исключительно икосаэдрическую квазикристаллическую фазу. В зависимости от режима получения параметр квазикристалличности  $a_q$  изменяется от 0,5180 до 0,5210 нм. В данной работе испытывали образцы, полученные со скоростью 19,5 м/с и имеющие в исходном состоянии  $a_q$  около 0,52050 нм.

По результатам съёмок облучённых образцов (фрагмент дифрактограмм показан на рис.1) было установлено, что после облучения общий вид дифрактограмм (общее количество отражений) не изменяется. Это означает, что фазовый состав остается неизменным. С увеличением дозы облучения отмечается изменение положения дифракционных линий, их интенсивности и ширины. Согласно теории рассеяния М.А. Кривоглаза [22], к изменению положения, интенсивности и ширины дифракционных максимумов приводят накопление и преобразование дефектов в структуре реальных кристаллов. Каких-либо оснований, не допускающих распространение этой теории на квазикристаллы, не должно быть. Единственной особенностью для множителей строчки интенсивности может быть определение структурного множителя, хотя в векторной форме он будет записываться примерно так же, как и для кристаллов. Следует отметить, что к известному набору структурных дефектов в случае квазикристаллов добавляются специфические фазонные дефекты [1, 23-25]. Фазон как дефект вносит локальный химический и структурный беспорядок, а также сбивает фазу рассеянной волны. Их присутствие в структуре проявляется в смещении и ушире-

нии дифракционных максимумов, причем проявляется это более существенно для отражений с большим значением  $Q_{\perp}$  [23-25].

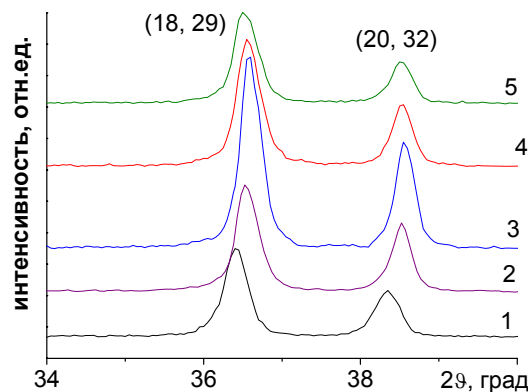


Рис. 1. Изменение вида фрагмента дифракционной картины с увеличением дозы облучения  $\text{Ti}_{41,5}\text{Zr}_{41,5}\text{Ni}_{17}$ -лент:  
1 - исходное состояние;  
2 - 2000; 3 - 3900; 4 - 5850 и 5 - 7000 рад

Изменение положения максимумов проанализировано для отражения (136, 220). Оно расположено на больших углах дифракции и имеет наименьшее значение  $Q_{\perp}$ , а поэтому слабо зависит от присутствия фазонов. Было установлено, что с увеличением дозы облучения наблюдается постепенное уменьшение параметра квазикристалличности от 0,50048 до 0,52000 нм (рис. 2).

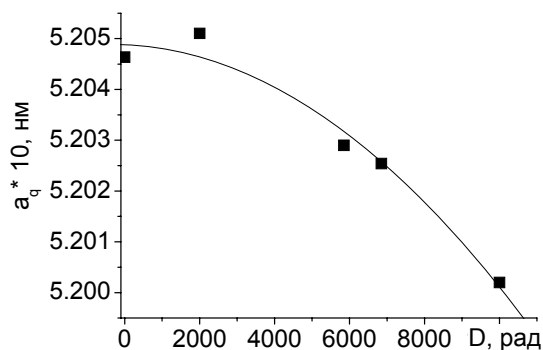


Рис. 2. Зависимость параметра квазикристалличности икосаэдрической квазикристаллической фазы от дозы облучения

Это снижение может свидетельствовать об изменении среднего межатомного расстояния, а значит, и размера кластера Бергмана, являющегося основной структурной единицей построения данного квазикристалла. Снижение параметра может быть связано с выходом из регулярной структуры крупных атомов (по-видимому, Zr), их оседанию на стоках и развитию дефектности структуры. Таким образом, процесс действительно может быть связан с накоплением структурных дефектов.

Изменение интенсивности дифракционных максимумов и их полуширины с увеличением дозы облучения приведено на рис. 3, 4 соответственно.

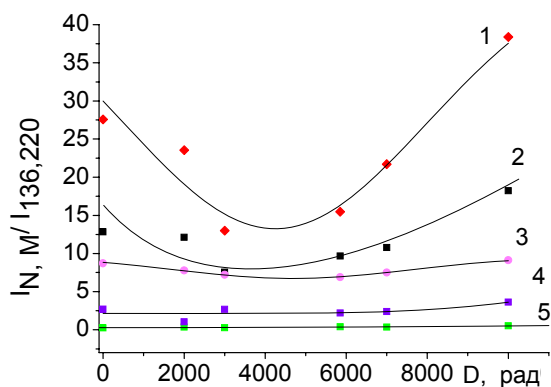


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности отражений от  $D$  – дозы облучения:  
 1 – отражение (18, 29); 2 – (20, 32); 3 – (52, 84);  
 4 – (72, 116); 5 – (28, 44)

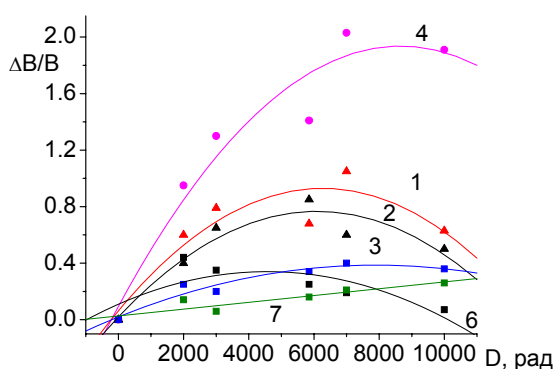


Рис. 4. Относительное изменение ширины дифракционных максимумов с увеличением дозы облучения:  
 1 – отражение (18, 29); 2 – (20, 32); 3 – (52, 84);  
 4 – (72, 116); 6 – (28, 44); 7 – (136, 220)

Все выбранные для анализа отражения имели различные значения модулей составляющих дифракционного вектора  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  (таблица). Отметим, что нумерация кривых на рисунках совпадает с номерами отражений в таблице.

Согласно литературным данным изменения интенсивности и ширины из-за изменения дефектности для отражений с разными модулями дифракционного вектора должны быть закономерно различными. Так, для (136, 220) с увеличением дозы выявляется тенденция к снижению интегральной интенсивности. Однако для разных образцов разброс точек на зависимости был существенным, что объясняется разной площадью образцов. Поэтому, чтобы исключить факт разницы в отражающих объемах для отражений, приведенных в таблице, было выполнено нормирование на интенсивность (136, 220). Именно эта величина приведена на рис. 3.

Анализируя рисунок, можно сделать пару заключений. Во-первых, изменение интенсивности для отражений с разным набором  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$  различно по масштабу, а во-вторых, для чувствительных к облучению отражений зависимость от дозы хорошо описывается функцией Гаусса. Теория М.А. Кривоглаза [22] определяет, что на стадии накопления дефектов, на стадии роста их мощности интенсивность действительно должна изменяться по

функции Гаусса, а когда концентрация дефектов становится существенной, то интенсивность перестает изменяться. Это и наблюдается экспериментально.

Индексы отражений и соответствующие им составляющие дифракционного вектора

Индексы Кана (N,M)	Значение $Q_{\perp}$ , нм <sup>-1</sup>	Значение $Q_{\parallel}^2$ , нм <sup>-2</sup>
1. (18,29)	0,14	64,92
2. (20,32)	0,24	71,78
3. (52,84)	0,15	187,91
4. (72,116)	0,28	259,84
5. (26,41)	0,42	92,34
6. (28,44)	0,46	99,19
7. (136,220)	0,09	491,96

Что касается первого заключения, то для его объяснения следует вспомнить, что в строчке интенсивности для поликристаллов множителем, наиболее влияющим на интенсивность разрешенных отражений, является фактор Дебая-Валлера -  $e^{-2M}$ . В нашем случае он будет иметь вид

$$I_{(N,M)} \propto \exp\left(-\frac{4}{3}\pi^2(Q_{\parallel} + Q_{\perp})^2\langle\Delta\bar{u}\rangle^2\right),$$

где в  $2M$  которого входят произведение модуля дифракционного вектора  $\vec{Q}_{6D} = \vec{Q}_{\parallel} + \vec{Q}_{\perp}$  и проекции вектора смещения атома из идеальной позиции вследствие наличия дефектов структуры. Из этого выражения следует, что интенсивность действительно зависит от сочетания  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$ . Кроме того, важно отметить, что к наличию дефектов должны быть чувствительны отражения с наименьшими  $Q_{\parallel}$  и  $Q_{\perp}$ , причем не к одному из них, а к сумме, что и наблюдается в эксперименте. При равных значениях вектора  $Q_{\perp}$  более существенно изменяется интенсивность отражений с меньшим значением дифракционного вектора в параллельном пространстве. С увеличением  $Q_{\perp}$  эффект изменения интенсивности отражений снижается. Делается вывод, что разные отражения чувствительны к накоплению радиационных дефектов по-разному. Поскольку  $Q_{\perp}$  коррелирует с содержанием фазонов, а  $Q_{\parallel}$  - с содержанием хаотически ориентированных дислокаций, то считаем, что приведенные на рис. 3 зависимости отражают накопление в результате облучения обоих типов дефектов.

Накопление дефектов структуры подтверждается также и изменением ширины дифракционных линий (см. рис. 4). Видно, что для отражений с различными индексами (N, M) эффект изменения ширины различен и по величине, и по характеру. Так для отражений (136, 220) и (28, 44) эффект изменения ширины наименьший. Отражение (136, 220) характеризуется малым  $Q_{\perp}$  и большим  $Q_{\parallel}$ , а поэтому его уширение описывает увеличение плотности исключительно хаотически расположенных дислокаций. От-

ражение (28, 44) имеет наибольшее значение  $Q_{\perp}$  и малое  $Q_{\parallel}$ , поэтому его изменение ширины связано с накоплением дефектов только фазонного типа. Характер изменения - возрастание до определённой дозы и далее снижение - свидетельствует о начальном накоплении фазонов с последующей их трансформацией путем взаимодействия с дислокациями или объединением между собой. Наибольший эффект изменения ширины наблюдается у рефлексов, у которых сумма дифракционных векторов в перпендикулярном и физическом пространствах наибольшая. Эти отражения чувствительны и к содержанию дислокаций, и к содержанию фазонов. Немонотонный характер изменения ширины для них также сохраняется.

Таким образом, на основании изменения положения, ширины и интенсивности отражений делается вывод, что облучение  $Ti_{41,5}Zr_{41,5}Ni_{17}$  квазикристаллов приводит к преобразованию субструктуры, заключающейся в накоплении дефектов фазонного типа, их трансформации, и взаимодействию с дислокациями.

В результате фазового анализа образцов состава  $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$  было установлено присутствие в них трех фаз: фазы 2/1 кристалла-аппроксиманта с периодом решетки  $a_{2/1}=1,962$  нм (основная), фазы кристалла-аппроксиманта 1/1 с периодом решетки  $a_{1/1}=1,431...1,434$  нм и квазикристаллической икосаэдрической фазы с параметром квазикристаллическости  $a_q \approx 0,5200$  нм (следы).

С увеличением дозы облучения фазовых изменений не наблюдается, и параметры решеток также остаются неизменными. Увеличение приводит к изменению интенсивности отдельных отражений (рис. 5).

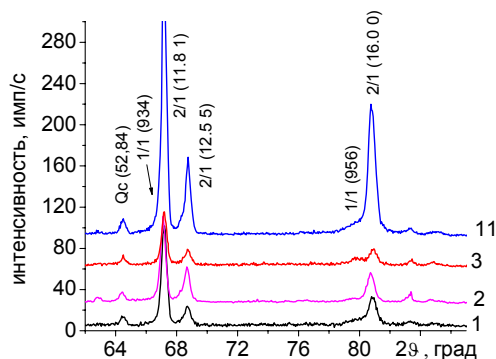


Рис. 5. Фрагменты дифракционных картин от образцов  $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$  в исходном состоянии (1) и после облучения в 3250 (2), 6800 (3) и 10000 рад (4)

Так, интенсивность линий икосаэдрической фазы не изменяется, а интенсивность линий аппроксиманта 1/1 незначительно снижается, в то время как интенсивность аппроксиманта 2/1 возрастает очень существенно. Например, интенсивность отражения (16.00) фазы кристалла-аппроксиманта 2/1 изменяется от значения  $\approx 19$  до  $\approx 90$  имп./с. Поскольку изменение периодов решеток нет, то изменение интенсивности не может быть связано с диффузионным фазовым превращением.

Также трудно предполагать развитие текстуры. Остается вероятной только одна причина - изменение совершенства структуры фаз кристаллоаппроксимантов. В подтверждение правильности такого предположения свидетельствует изменение ширины отражений. Как можно видеть из рис. 6, ширина отражения с индексами (16.00), принадлежащего фазе кристалла-аппроксиманта 2/1, уменьшается, а ширина отражения (956) фазы кристалла-аппроксиманта 1/1 увеличивается.

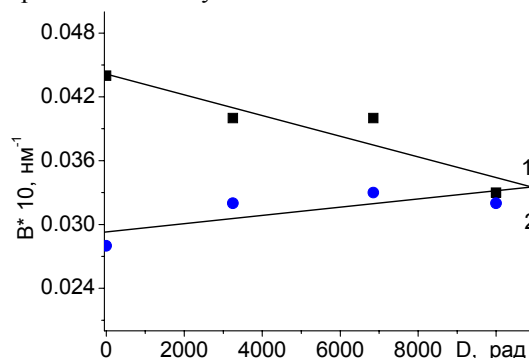


Рис. 6. Зависимость ширины дифракционных максимумов от дозы облучения для фазы 2/1 кристалла-аппроксиманта (1) и фазы 1/1 кристалла-аппроксиманта (2)

Поскольку ширина дифракционных максимумов в размерности обратного пространства пропорциональна плотности хаотически расположенных дефектов дислокационного типа [24], то можно сделать вывод, что увеличение дозы облучения совершенствует структуру фазы кристалла-аппроксиманта 2/1 и увеличивает дефектность фазы кристалла-аппроксиманта 1/1.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при облучении быстро закаленных лент тормозным рентгеновским излучением стимулированных радиацией фазовых превращений в икосаэдрической квазикристаллической фазе в  $Ti_{41,5}Zr_{41,5}Ni_{17}$ -образцах и в фазах кристаллоаппроксимантов 2/1 и 1/1, а также в  $i$ -фазе  $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$ -образцов не происходит даже при максимальной дозе облучения.

2. Показано, что при увеличении дозы облучения происходит изменение вида дифракционной картины квазикристалла, что проявляется в смещении дифракционных максимумов, изменении их интенсивности и ширины. Параметр квазикристаллическости уменьшается от 0,52049 до 0,52005 нм. Выявлено, что немонотонный характер изменения относительной интенсивности и ширины дифракционных максимумов зависит от величины составляющих дифракционного вектора в физическом и перпендикулярном пространствах. Такие данные свидетельствуют о накоплении и перераспределении хаотически расположенных дефектов фазонного и дислокационного типов.

3. Показано, что в образцах состава  $Ti_{41,5}Hf_{41,5}Ni_{17}$  параметр квазикристаллическости икосаэдрической фазы  $\approx 0,5200$  нм, период решетки  $a_{1/1}=1,431...1,434$  нм фазы кристалла-

аппроксиманта 1/1 и период решетки  $a_{2/1}=1,962$  нм фазы 2/1 кристалла-аппроксиманта с увеличением дозы рентгеновского облучения остаются неизменными.

4. Установлено, что с ростом дозы облучения ширина отражений, которые принадлежат 2/1-фазе, уменьшается приблизительно на 30 %, а ширина отражений 1/1-фазы при этом растет на 10 %, что свидетельствует о совершенствовании структуры фазы кристалла-аппроксиманта 2/1 и увеличении дефектности фазы кристалла-аппроксиманта 1/1.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Z.M. Stadnik. *Physical properties of quasicrystals*. Berlin: Springer, 1999, 365 p.
- C. Janot. *Quasicrystals*. Oxford: Clarendon press, 1994, 409 p.
- Ш.Х. Ханнанов. Кристаллическое, квазикристаллическое и аморфное состояние металлов // *ФММ*. 1993, т. 75, №2, с. 26-37.
- R. Chatterjee, D. Kanjilal, A. Dunlap. Effect of swift heavy ion irradiation on quasicrystalline materials // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B*. 1999, N 156, p. 201-205.
- G. Coddens, A. Dunlop, H. Dammak. Study of the effect of high electronic excitations in quasicrystals irradiated with heavy ions // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2003, N 211, p. 122-132.
- S. Mechler, C. Abromeit, N. Wanderka. Phase transformation quasicrystalline-amorphous in Zr-Ti-Ni-Cu by swift heavy ions // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2006, v. 245, p. 133-136.
- R. Wang, X. Yang, H. Takahashi, S. Ohnuki. Phase transformation induced by irradiating an  $Al_{62}Cu_{25.5}Fe_{12.5}$  icosahedral quasicrystal // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1995, v. 7, p. 2105-2114.
- K. Sato, F. Baier, W. Sprengel, H.E. Schaefer. Vacancies in quasicrystals: Effects of electron irradiation // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2002, v. 66, p. 092201/1-092201/3.
- М.А. Эланго. *Элементарные неупругие радиационные процессы*. М.: «Наука», 1988, 152 с.
- Ч.Б. Лущик, А.И. Лущик. *Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твёрдых телах*. М.: «Наука», 1989, 264 с.
- В.М. Ажажа, А.М. Бовда, С.Д. Лавриненко, Л.В. Онищенко и др. Синтез и стабильность Ti-Zr-Ni-квазикристаллов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2007, № 4, с. 82-87.
- В.М. Ажажа, С.В. Малыхин, Б.А. Мерисов, А.Т. Пугачёв и др. Особенности структуры и свойств Ti-Zr-Ni-квазикристаллов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2009, № 6, с. 115-125.
- V. Azhazha, A. Grib, G. Khadzhay, S. Malykhin, et al. Superconductivity of Ti-Zr-Ni Alloys Containing Quasi-Crystals // *Physics Letters A*. 2002, v. 303, p. 87-90.
- V. Azhazha, A. Grib, G. Khadzhay, S. Malykhin, et al. Diffusion of hydrogen in Ti-Zr-Ni quasicrystals // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2003, v. 15, p. 5001-5004.
- V. Azhazha, A. Grib, G. Khadzhay, S. Malykhin, et al. The electrical resistivity of Ti-Zr-Ni quasicrystals in the interval 1.3-300 K // *Physics Letters A*. 2003, N 349, p. 539-543.
- V. Azhazha, S. Dub, G. Khadzhay, S. Malykhin, et al. Structure and peculiarities of nanodeformation in Ti-Zr-Ni quasi-crystals // *Phil. Mag.* 2004, v. 84, N 10, p. 983-990.
- V.M. Azhazha, G.Ya. Khadzhay, S.V. Malykhin, B.A. Merisov, et al. The electrical resistivity of  $Ti_{41.5}Zr_{41.5}Ni_{17}$  quasicrystals in the temperature region 0.3-300 K // *Fizika Nizkikh Temperatur*. 2005, v. 31, N 6, p. 629-633.
- S.V. Malykhin, A.T. Pugachov, E.E. Chernokhvostenko. Thermal Expansion and Debye Temperature of Ti-Zr-Ni Quasicrystal // *Functional Materials*. 2006, v. 13, N 4, p. 596-599.
- S. Malykhin. Residual stresses in  $Ti_{41.5}Zr_{41.5}Ni_{17}$  quasi-crystalline ribbons measured by X-ray diffraction // *Functional Materials*. 2007, v. 14, N 2, p. 223-227.
- J. Cahn, D. Shechtman, D. Grafias. Indexing of icosahedral quasiperiodic crystals // *J. Mat. Res.* 1986, v. 1, N 1, p. 30-54.
- P. Lu, K. Deffeyes, P. Steinhard, N. Yao. Identifying and indexing icosahedral quasicrystals from powder diffraction patterns // *Phys. Rev. Lett.* 2001, v. 87, N 27, p. 275507-1-275507-4.
- М.А. Кривоглаз. *Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах*. Киев: «Наукова думка», 1983, 408 с.
- V. Franz, M. Feuerbacher, M. Wollgarten, K. Urban. Electron diffraction analysis of plastically deformed icosahedral Al-Pd-Mn single quasicrystals // *Phil. Mag. Lett.* 1999, v. 79, N 6, p. 333-342.
- A. Letoublon, F. Yakov, F. Livet, F. Bley, et al. Coherent X-ray diffraction and phason fluctuations in quasicrystals // *Europhys. Lett.* 2001, v. 54, N 6, p. 753-759.
- M. Jono, Y. Matsuo, K. Yamamoto. X-ray diffraction study of phason strain in an Al-Cu-Fe icosahedral quasicrystal // *Phil. Mag.* 2001, v. 81, N 11, p. 2577-2590.

Статья поступила в редакцию 20.10.2010 г.

**ЗМІНЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРИ ШВИДКОЗАГАРТОВАНИХ СТРІЧОК  
Ti<sub>41,5</sub>Zr<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub> ТА Ti<sub>41,5</sub>Hf<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub> ПРИ РАДІАЦІЙНОМУ ВПЛИВІ**

**V.M. Azhazha**, С.Д. Лавриненко, Ю.Ф. Лонін, М.М. Пилипенко, Б.В. Серєда, С.В. Крячко,  
С.В. Малихін, А.Т. Пузачов, М.В. Решетняк

Методом дифракції рентгенівських хвиль досліджено вплив опромінення потоками рентгенівських квантів з енергією  $\leq 1$  MeV і дозою до  $10^4$  рад на фазову та структурну стабільність ікосаедричної квазікристалічної фази (*i*-фази) та споріднених до неї фаз кристалів-аппроксимантів в стрічках складу Ti<sub>41,5</sub>Zr<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub> и Ti<sub>41,5</sub>Hf<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub>, що отримані за допомогою швидкісного загартування.

**CHANGES OF STRUCTURE CHARACTERISTICS IN Ti<sub>41,5</sub>Zr<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub>  
AND Ti<sub>41,5</sub>Hf<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub> RAPIDLY QUENCHED RIBBONS UNDER RADIATION INFLUENCE**

**V.M. Azhazha**, S.D. Lavrinenko, Yu.F. Lonin, M.M. Pylypenko, B.V. Sereda, S.V. Kryachko,  
S.V. Malykhin, A.T. Pugachov, M.V. Reshetnyak

Influence of irradiation by X-ray fluxes with energies  $\leq 1$  MeV and doses up to  $10^4$  rad on phase and structural stability of the icosahedral quasicrystal phase (*i*-phase) and related crystals-approximant phases in Ti<sub>41,5</sub>Zr<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub> and Ti<sub>41,5</sub>Hf<sub>41,5</sub>Ni<sub>17</sub> ribbons prepared by rapid quenching was studied by the X-ray diffraction method.