

УДК 539.122.04

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ СМЕСИ ПОРОШКА СОСТАВА Ti+Al

*М.В. ЛОГИНОВА¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотруд.
В.И. ЯКОВЛЕВ¹, канд. техн. наук, доцент
А.А. СИТНИКОВ¹, доктор техн. наук, профессор
С.Г. ИВАНОВ¹, канд. техн. наук, зав. лаб.,
А.В. СОБАЧКИН¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотруд.
А.З. НЕГОДЯЕВ¹, аспирант
А.В. ГРАДОБОЕВ², доктор техн. наук, профессор
(¹АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул,
²ТПУ, г. Томск)*

Поступила 8 июля 2015

Рецензирование 17 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Логинова М.В. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: anicpt@rambler.ru

Проведено экспериментальное исследование структурного состояния компонентов при воздействии γ -облучения на порошковую смесь состава Ti+Al и смесь того же состава после предварительной механоактивационной обработки. Воздействие γ -облучения осуществлялось в малых дозах. Для исследования параметров тонкой структуры использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Установлена зависимость структурных параметров и тонкой структуры (размеры областей когерентного рассеяния, микродеформации) после воздействия γ -облучения от предварительной механообработки порошковой смеси. Экспериментально выявлено, что влияние γ -облучения на структурное состояние компонентов механоактивированной смеси различно. Установлено, что предварительная механоактивационная обработка порошковой смеси Ti+Al является стимулятором для радиационно-индуцированного состояния компонентов даже при малых дозах γ -облучения.

Ключевые слова: порошковая смесь, алюминий, титан, механоактивация, γ -облучение, рентгеновская дифрактометрия, структурные параметры, кристаллическая решетка, зерно, микронапряжения.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-93-101

Введение

Одним из способов изменения физико-механических и химических свойств в материалах является формирование в них наноструктурных состояний. Добиться этого можно путем механического измельчения порошковых материалов – методом механоактивационной обработки в планетарной шаровой мельнице, при воздействии которой достигается предельная степень

измельчения размеров зерна, увеличивается напряженное состояние кристаллической решетки, возникает неравновесное состояние [1–5]. В последнее время для изменения структурных характеристик и свойств материалов все чаще используют новые методы внешнего воздействия, одним из которых является γ -облучение материалов. Интенсивные потоки радиации применяются как при решении задач, связанных с разработкой новых поколений качественных материалов,

так и при исследовании фундаментальных проблем физики твердого тела [6, 7]. Выявлено, что после радиационного воздействия на материалы формируется особое состояние вещества, происходят существенные изменения структуры и свойств, вещество насыщается дефектами, уменьшаются размеры кристаллитов, меняются параметры решетки, также могут происходить радиационно-иницированные фазовые превращения [8–10]. Кроме того, как следствие γ -облучения происходит изменение физико-механических свойств облученных материалов. Экспериментально установлено, что в зависимости от условий облучения в структуре вещества могут происходить процессы, приводящие ее в неравновесное разупорядоченное состояние, либо под действием термодинамических сил и радиационно-стимулированной диффузии структура может принять упорядоченное состояние.

Из проведенного обзора публикаций выявлено, что большая часть научных исследований в этой области касается влияния радиационного излучения на полупроводниковые приборы и микросхемы, так как во многих ситуациях эти излучения воздействуют на системы управления и радиоэлектронную аппаратуру, основой которых служат изделия полупроводниковой электроники. Однако в последнее время все большее внимание начали уделять исследованию влияния радиационного излучения на фазовое состояние и структурные параметры при воздействии на металлические материалы (в частности, на системы Fe-Cr-Ni, Ni-Cr, Cu-Ni, Fe-Cr, V-Cr-Ti и др.) [11–14].

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана порошковая смесь Ti+Al [15–16], поскольку в последнее время алюминиды титана и сплавы на их основе находят широкое применение для конструкций и деталей, работающих в экстремальных условиях, в том числе в атомной, авиационной, энергетической областях [17–18]. Это стимулирует исследование явлений, возникающих при взаимодействии материалов данной системы с радиационным излучением. Особый интерес представляет применение перед γ -облучением предварительной механоактивационной обработки порошковой смеси, за счет которой система уже переходит в неравновесное состояние с избыточной энергией. Это направ-

ление исследований является еще малоизученным. Таким образом, для понимания процессов и причин формирования радиационно-индуцированных структурных состояний в механоактивированной порошковой смеси Ti+Al нужны такие исследования, которые могут послужить основой для новой технологии модифицирования перспективных материалов.

Исходя из изложенного целью настоящей работы является исследование влияния воздействия малых доз γ -излучения на изменение структурных параметров порошковой смеси Ti+Al при предварительном воздействии на нее механоактивационной обработки.

Методика экспериментального исследования

В качестве объектов исследований использовались порошки титана ПТХ со средним размером частиц 50 ± 10 мкм и порошки алюминия АСД-1 со средним размером 12 мкм. Для экспериментального образца первой серии применялась механическая смесь порошков в соотношении: Al 50 мас. % + Ti 50 мас. %.

Для получения образца второй серии исходная порошковая смесь подвергалась механической активации в планетарной шаровой мельнице АГО-2 в течение 7 мин. Центробежное ускорение цилиндров 40 g.

Готовились цилиндрические образцы путем прессования порошковых смесей на стандартном оборудовании для проведения исследований порошковых материалов. Нагрузка на лабораторном прессе составляла 40 кН.

На следующем этапе проводилось облучение экспериментальных образцов γ -лучами от источника излучения на установке γ -излучения. Доза облучения составляла 2×10^5 рад., время облучения 30 мин.

Структурно-фазовый анализ образцов до и после γ -облучения осуществлялся на дифрактометре рентгеновском общего назначения ДРОН-6, на медном излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Дифрактограммы всех образцов регистрировались в идентичных условиях, что позволило более корректно сравнивать полученные величины. Шаг сканирования $h = 0,05^\circ$, время экспозиции $t = 3 \text{ с}$. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли

с помощью пакета программ PDWin. Для расчета структурных параметров использовалась программа Size&Strain пакета PDWin с поправками на приборное уширение. Исследование микроструктуры образцов осуществлялось на исследовательском оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Измерения микротвердости проводили с использованием цифрового микротвердомера МН-6, осуществляющего измерение микротвердости по Виккерсу.

Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 представлены дифрактограммы порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % и смеси того же состава после γ -облучения.

Из сравнительного анализа дифрактограмм для простой смеси порошков следует, что ха-

рактер расположения дифракционных максимумов Ti (ГПУ-решетка) и Al (ОЦК-решетка) и их форма (ширина линий) до и после γ -облучения не меняются. Следовательно, размеры блоков когерентного рассеивания в пределах ошибки определения остаются неизменными (табл. 1). Увеличение максимальной интенсивности облученного образца ($I_{\max \text{ обл.}} = 226,7$ усл. ед.) относительно необлученного ($I_{\max \text{ исх.}} = 163$ усл. ед.) свидетельствует о высокой кристалличности полученной структуры.

В табл. 1 представлены структурные параметры обоих компонентов в порошковой смеси до и после γ -облучения.

На рис. 2 представлены дифрактограммы механоактивированной в течение 7 мин порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % и механоактивированной смеси того же состава после γ -облучения образцов.

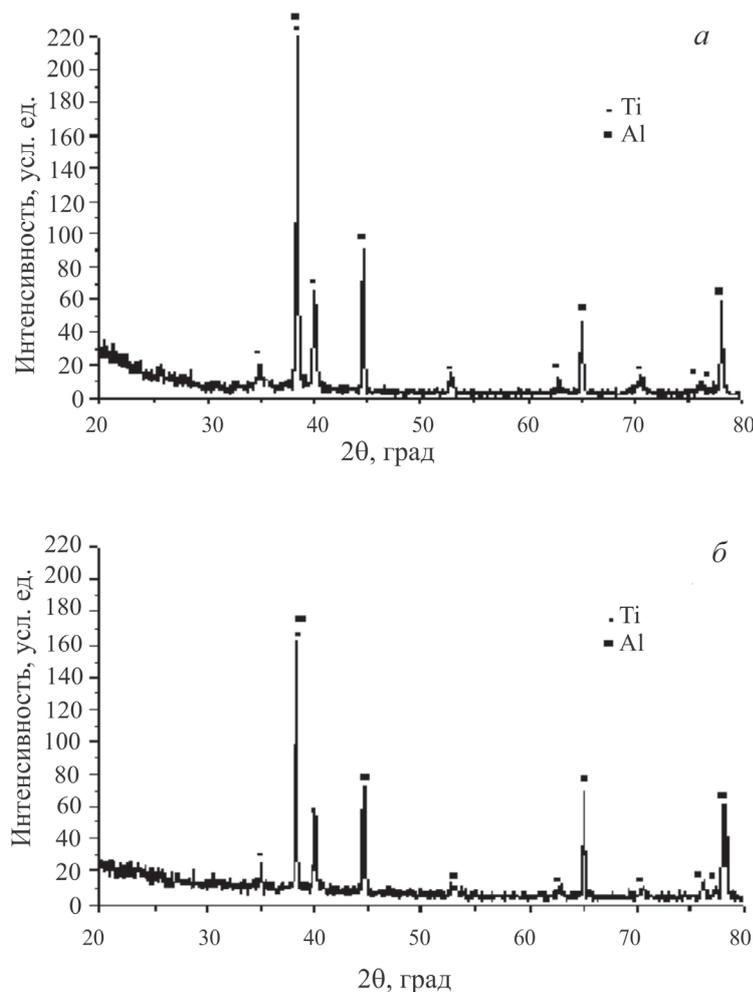


Рис. 1. Дифрактограммы порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. %:

a – до γ -облучения; *б* – после γ -облучения

Структурные параметры и объем кристаллических решеток Ti и Al в порошковой смеси до и после γ -облучения

Параметры ячейки	Ti		Al		Эталон Ti*	Эталон Al*
	до γ -облучения	после γ -облучения	до γ -облучения	после γ -облучения	Sys: Hexagonal	Sys: Cubic
a , (Å)	2,954738	2,954447	4,054839	4,054643	2,92	4,0406
b , (Å)	2,954738	2,954447	4,054839	4,054643	2,92	4,0406
c , (Å)	4,693880	4,694138	4,054839	4,054643	4,67	4,0406
V , (Å ³)	35,490	35,485	66,669	66,659	34,48	66,49

*Anal. Chem., Hanawalt et al., 10, 475, 1938 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3).

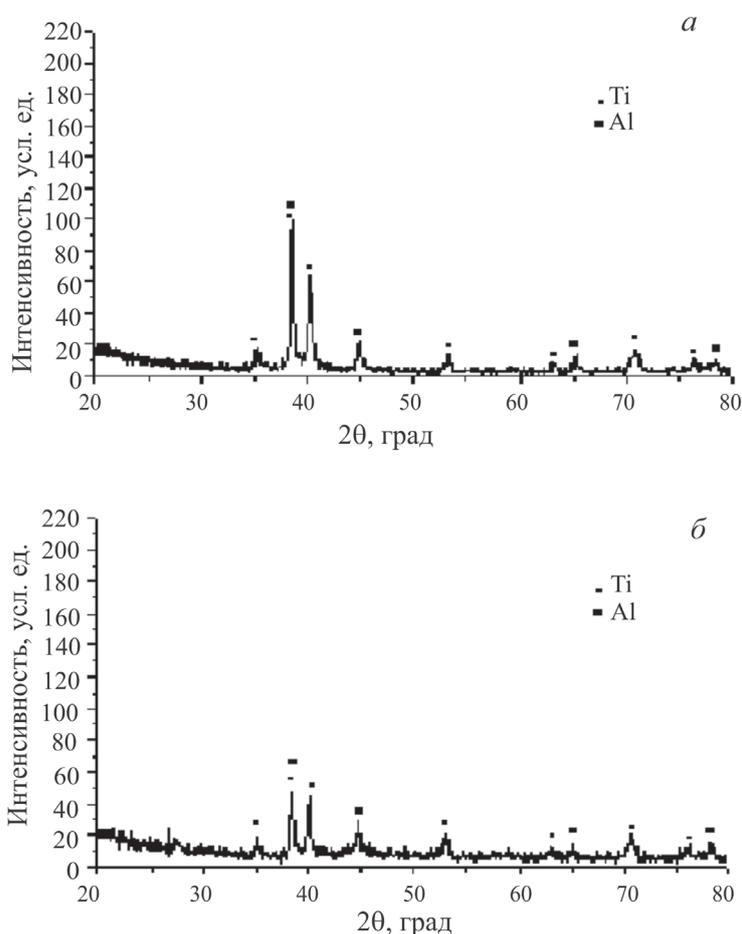


Рис. 2. Дифрактограммы механоактивированной 7 мин порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. %:

a – до γ -облучения; *б* – после γ -облучения

На дифрактограмме механоактивированной смеси (рис. 2, *a*) идентифицируются уширенные дифракционные отражения Ti и Al с малой интенсивностью ($I_{\max} = 48,4$ усл. ед) и повышенный диффузный фон, что свидетельствует

о наличии неравновесных дефектов в продукте размолта и малых размерах кристаллитов. Дополнительные соединения не образуются. После механоактивации в образце формируются крупные композитные частицы, так называемые механо-

композиты, со средними размерами 10...60 мкм (рис. 3).

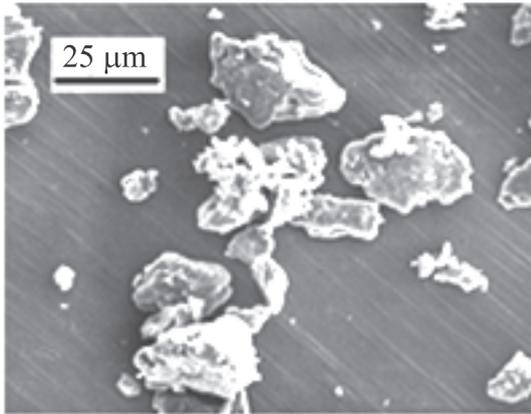


Рис. 3. Микроструктура порошковой смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % после 7 мин МА

Из анализа полученной дифрактограммы следует, что воздействие γ -облучения по-разному сказывается на структурные изменения компонентов механоактивированной порошковой смеси. Наблюдается рост интенсивностей дифракционных максимумов Ti, в то время как интенсивности отражений Al немного снижаются одновременно с увеличением ширины линий. Из расчета тонкой структуры обоих компонентов в механоактивированной смеси следует, что применяемая доза γ -облучения по-разному воздействует на параметры тонкой структуры компонентов. Для Ti после γ -облучения величины ОКР уменьшаются незначительно и незначительно увеличивается наличие микронапряжений в кристаллической решетке. До облучения

$D(Ti) = 683,64 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 4,586 \times 10^{-6}$, после γ -облучения $D(Ti) = 561,75 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 5,025 \times 10^{-6}$. Для Al после γ -облучения происходит значительное уменьшение размеров кристаллитов и значительное увеличение микронапряжений. До облучения $D(Al) = 315,09 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 2,773 \times 10^{-6}$, после γ -облучения $D(Al) = 79,22 \text{ \AA}$, $\langle \varepsilon^2 \rangle = 9,480 \times 10^{-6}$.

В табл. 2 представлены структурные параметры обоих компонентов в механоактивированной смеси до и после γ -облучения.

На рис. 4 представлены микроструктуры образцов простой механической смеси состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. % после γ -облучения (а) и γ -облученной механоактивированной в течение 7 мин смеси того же состава (б). Приведенные изображения показывают видимые отличия в структурах простой облученной порошковой смеси и механоактивированной смеси после облучения.

Микроструктура образца облученной немеханоактивированной смеси (рис. 4, а) характеризуется четкими границами раздела фаз компонентов титана и алюминия, а также наличием пор. После облучения образца механоактивированной смеси размер пор уменьшается (рис. 4, б), формируется волокнистая структура, на которой можно различить две фазы без четко выраженных границ между ними.

Из проведенных расчетов по микротвердости следует, что среднее значение микротвердости у облученного немеханоактивированного образца 95,9HV, у облученного образца из механоактивированной смеси среднее значение твердости увеличивается до 115 HV.

Таблица 2

Структурные параметры и объем кристаллических решеток Ti и Al в механоактивированной смеси до и после γ -облучения

Параметры ячейки	Ti МА 7 мин		Al МА 7 мин		Эталон Ti* Sys: Hexagonal	Эталон Al* Sys: Cubic
	до γ -облучения	после γ -облучения	до γ -облучения	после γ -облучения		
$a, (\text{Å})$	2,929598	2,946963	4,051394	4,045660	2,92	4,0406
$b, (\text{Å})$	2,929598	2,946963	4,051394	4,045660	2,92	4,0406
$c, (\text{Å})$	4,723319	4,670264	4,051394	4,045660	4,67	4,0406
$V, (\text{Å}^3)$	35,107	35,125	66,499	66,217	34,48	66,49

*Anal. Chem., Hanawaltetal., 10, 475, 1938 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3).

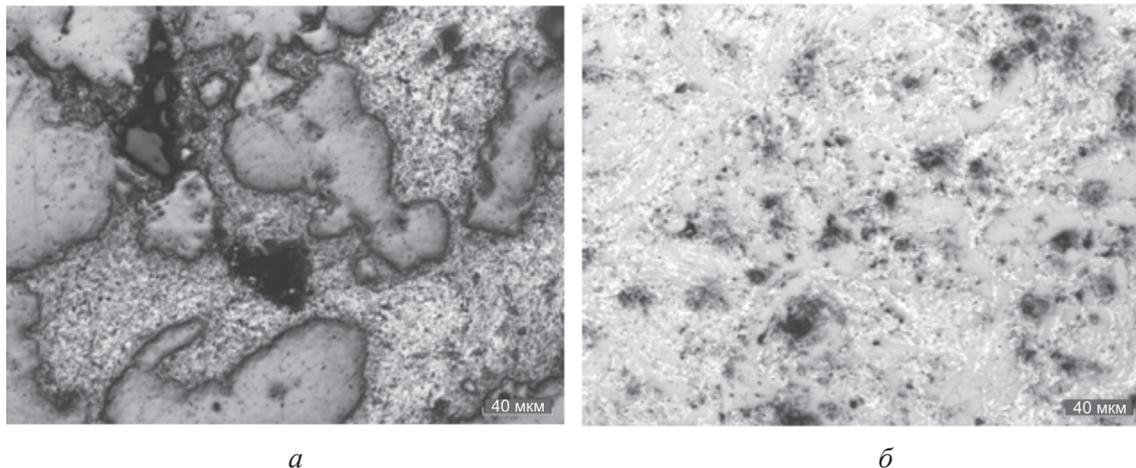


Рис. 4. Микроструктура облученной простой порошковой смеси (а) и механоактивированной смеси после облучения (б) состава Ti 50 мас. % + Al 50 мас. %

Таким образом, по полученным экспериментальным данным можно судить о том, что малые дозы γ -облучения не оказывают существенного влияния на механическую смесь титана и алюминия, когда структуры исходных компонентов находятся в равновесном состоянии. При предварительном же воздействии на них механоактивационной обработки, когда в структурах наблюдается неравновесное состояние, выраженное в деформировании кристаллической решетки, наличии микродеформаций и уменьшении размеров областей когерентного рассеяния, облучение γ -квантами дополнительно влияет на изменение структурных параметров компонентов. Причем воздействие на алюминий γ -облучения оказывается сильнее и выражается в значительном уменьшении ОКР, увеличении микродеформаций кристаллической решетки и уменьшении ее объема.

Выводы

Приведенные выше исследования показывают, что путем применения малых доз γ -облучения в совокупности с предварительной механоактивационной обработкой порошковой смеси Ti+Al можно воздействовать на изменения структурных параметров и, как следствие, изменять механические свойства материалов. В облученном образце с предварительной механоактивацией происходит формирование радиационно-стимулированных состояний компонентов, что не наблюдается в немеханоактивированном образце. Происходит увеличение значения ми-

кротвердости по сравнению с облученным немеханоактивированным образцом, причем механические свойства коррелируют со структурными изменениями.

Список литературы

1. Механокомпозиты – прекурсоры для создания материалов с новыми свойствами / отв. ред. О.И. Ломовский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010. – 424 с. – ISBN: 978-5-7692-1108-9.
2. Григорьева Т.Ф., Баринаева А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 312 с.
3. Microwave-assisted combustion synthesis in mechanically activated 3Ti + Al powder mixtures: structure formation issues / V.Yu. Filimonov, A.A. Sitnikov, A.V. Afanas'ev, M.V. Loginova, V.I. Yakovlev, A.Z. Negodyaev, D.V. Schreifer, V.A. Solov'ev // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2014. – Vol. 23, iss. 1. – P. 18–25. – doi: 10.3103/S1061386214010038.
4. Mechanical activation and gasless explosion: nanostructural aspects / A.S. Mukasyan, B.B. Khina, R.V. Reeves, S.F. Son // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 174, iss. 2/3. – P. 677–686. – doi: 10.1016/j.cej.2011.09.028.
5. The features of structure formation in mechanically activated powder mixture 3Ti + Al in the thermal explosion mode / V.Yu. Filimonov, A.A. Sytnikov, V.I. Yakovlev, M.V. Loginova, A.V. Afanasyev, A.Z. Negodyaev // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 621. – P. 71–76. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.621.71.
6. Кооперативные моды радиационного охрупчивания / В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, И.Н. Лаптев, И.М. Неклюдов, В.В. Брык, А.А. Пархоменко // Во-

просы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2012. – № 5 (81). – С. 51–61.

7. *Parkhomov V.A., Dmitriev A.V., Bazarzhapov A.D.* Spatial features of current systems of SFE-flares accompanied by gamma radiation // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2010. – Vol. 50, iss. 8. – P. 1003–1014. – doi: 10.1134/S0016793210080116.

8. Diffuse X-ray scattering measurements of point defects and clusters in iron / R.E. Stoller, F.J. Walker, E.D. Specht, D.M. Nicholson, R.I. Barabash, P. Zschack, G.E. Ice // *Journal of Nuclear Materials.* – 2007. – Vol. 367–370, pt. A. – P. 269–275. – doi:10.1016/j.jnucmat.2007.03.019.

9. Positron generation through laser Compton scattering gamma ray / D. Li, K. Imasaki, S. Miyamoto, K. Horikawa, S. Amano, T. Mochizuki // *Applied Physics Letters.* – 2009. – Vol. 94, iss. 9. – P. 091112-1–091112-3.

10. Modification of surface functionality and interlayer spacing of multi-walled carbon nanotubes using γ -rays / Z. Xu, C. Min, L. Chen, L. Liu, G. Chen, N. Wu // *Journal of Applied Physics.* – 2011. – Vol. 109, iss. 5. – P. 054303-1–054303-7. – doi: 10.1063/1.3552598.

11. *Tataroğlu A., Altındal S.* Gamma-ray irradiation effects on the interface states of MIS structures // *Sensors and Actuators A: Physical.* – 2009. – Vol. 151, iss. 2. – P. 168–172. – doi:10.1016/j.sna.2009.02.035.

12. *Moussa H.R.* Low dose of gamma irradiation enhanced drought tolerance in soybean // *Bulgarian Journal of Agricultural Science.* – 2011. – Vol. 17, N 1. – P. 63–72.

13. *Хмелевская В.С., Кордо М.Н.* Радиационно-индуцированные фазово-структурные превращения в сплавах систем V-Ti-Cr и V-Fe // *Вопросы атомной*

науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2008. – Т. 72, № 3. – С. 151–156.

14. Effects of 6 MeV electron irradiation on ZnO nanoparticles synthesized by microwave method / Sapnar K.B. Bhoraskar V.N., Dhole S.D., L.A. Ghule, K.M. Garadkar // *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, USA.* – New York, 2011. – P. 2166–2168.

15. Analysis of the influence of high temperature synthesis parameters on the structure formation in the mechanically activated 3Ti + Al powder mixture / M.V. Loginova, V.Yu. Filimonov, V.I. Yakovlev, A.A. Sytnikov, A.Z. Negodyaev, D.V. Shreifer // *Applied Mechanics and Materials.* – 2015. – Vol. 788. – P. 117–122. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.117.

16. Dynamic diffractometry of phase transformations during high-temperature synthesis in mechanically activated powder systems in the thermal explosion mode A.A. Popova, A.V. Sobachkin, I.V. Nazarov, V.I. Yakovlev, M.V. Loginova, A.A. Sitnikov, M.R. Sharafutdinov, N.Z. Lyakhov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics.* – 2013. – Vol. 77, iss. 2. – P. 120–122. – doi: 10.3103/S1062873813020275.

17. *Павлинич С.П., Зайцев М.В.* Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений // *Вестник УГАТУ.* – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 200–202.

18. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens, M. Peters. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003. – 532 p. – ISBN: 978-3-527-30534-6.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 93–101

Influence of low dose γ -irradiation on the structural state of mechanically activated powder mixtures of Ti + Al

Loginova M.V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: anicpt@rambler.ru

Yakovlev V.I.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: anicpt@rambler.ru

Sitnikov A.A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector, e-mail: sitalan@rambler.ru

Ivanov S.G.¹, Ph.D. (Engineering), Head of Laboratory, e-mail: serg225582@mail.ru

Sobachkin A.V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: pr_mech@mail.ru

Negodyaev A.Z.¹, Ph.D. student, e-mail: allneg@mail.ru

Gradoboev A.V.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: gradoboev1@mail.ru

¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The experimental research of the structural state of the powder components under the influence of γ -irradiation on the powder mixture Ti + Al, and the mixture of the same composition after preliminary mechanical activation treatment is carried out. Samples of selected powder mixtures were irradiated by γ -rays in small dose.

To investigate the parameters of fine structure the method X-ray diffraction is used. The dependence between preliminary mechanical activation treatment of the powder mixture and its structural parameters also as the fine structure (size of coherent scattering regions, microstrain) after influence γ -irradiation is established.

The influence γ -irradiation on the structural condition of mechanically activated mixture is different. From calculation of the fine structure of the two components in mechanically activated mixture follows that the applicable dose of γ -irradiation parameters affect the fine structure of components in different ways. For example, for Ti after γ -irradiation the value of crystal lattice significantly reduced ROC, and slightly increases the microstrains in the crystal lattice.

It was found that preliminary mechanical activation treatment of the powder mixture Ti + Al is a stimulator for the radiation-induced state of the components even at low doses of γ -irradiation. In the sample of preliminary mechanical activation powder mixture, which was irradiated by γ -rays, are formed radiation-induced states of components, which is not observed in the sample of non-mechanical activation powder mixture. Increasing the value of microhardness of irradiated sample in comparison non-mechanical activation powder mixture, wherein the mechanical properties are correlated with the structural changes.

Keywords:

powder mixture, aluminum, titanium, mechanical activation, γ -irradiation, X-ray diffraction, structural parameters, crystalline lattice, grain, microstrains.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-93-101

References

1. Lomovskii O.I., ed. *Mekhanokompozity – prekursorsy dlya sozdaniya materialov s novymi svoistvami* [Mechanocomposites – precursors for the creation of materials with new properties]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2010. 424 p. ISBN 978-5-7692-1108-9
2. Grigor'eva T.F., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. *Mekhanokhimicheskii sintez v metallicheskih sistemakh* [Mechanochemical synthesis in metallic systems]. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2008. 312 p.
3. Filimonov V.Yu., Sitnikov A.A., Afanas'ev A.V., Loginova M.V., Yakovlev V.I., Negodyaev A.Z., Schreifer D.V., Solov'ev V.A. Microwave-assisted combustion synthesis in mechanically activated 3Ti + Al powder mixtures: structure formation issues. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2014, vol. 23, iss. 1, pp. 18–25. doi: 10.3103/S1061386214010038
4. Mukasyan A.S., Khina B.B., Reeves R.V., Son S.F. Mechanical activation and gasless explosion: nanostructural aspects. *Chemical Engineering Journal*, 2011, vol. 174, iss. 2–3, pp. 677–686. doi: 10.1016/j.cej.2011.09.028
5. Filimonov V.Yu., Sytnikov A.A., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Afanasyev A.V., Negodyaev A.Z. The features of structure formation in mechanically activated powder mixture 3Ti + Al in the thermal explosion mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 621, pp. 71–76. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.621.71
6. Voevodin V.N., Ozhigov L.S., Laptev I.N., Bryk V.V., Neklyudov I.M., Parkhomenko A.A. Kooperativnyye mody radiatsionnogo okhrupchivaniya [Cooperation modes of the radiation embrittlement]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie – Problems of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, 2012, no. 5 (81), pp. 51–61.
7. Parkhomov V.A., Dmitriev A.V., Bazarzhapov A.D. Spatial features of current systems of SFE-flares accompanied by gamma radiation. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2010, vol. 50, iss. 8, pp. 1003–1014. doi: 10.1134/S0016793210080116
8. Stoller R.E., Walker F.J., Specht E.D., Nicholson D.M., Barabash R.I., Zschack P., Ice G.E. Diffuse X-ray scattering measurements of point defects and clusters in iron. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, vol. 367–370, pt. A, pp. 269–275. doi:10.1016/j.jnucmat.2007.03.019
9. Li D., Imasaki K., Miyamoto S., Horikawa K., Amano S., Mochizuki T. Positron generation through laser Compton scattering gamma ray. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 9, pp. 091112-1–091112-3. doi: 10.1063/1.3094882

10. Xu Z., Min C., Chen L., Liu L., Chen G., Wu N. Modification of surface functionality and interlayer spacing of multi-walled carbon nanotubes using γ -rays. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, iss. 5, pp. 054303-1–054303-7. doi: 10.1063/1.3552598
11. Tataroğlu A., Altındal S. Gamma-ray irradiation effects on the interface states of MIS structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, vol. 151, iss. 2, pp. 168–172. doi:10.1016/j.sna.2009.02.035
12. Moussa H.R. Low dose of gamma irradiation enhanced drought tolerance in soybean. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 63–72.
13. Khmelevskaya V.S., Kordo M.N. Radiatsionno-indutsirovannyye fazovo-strukturnyye prevrashcheniya v splavakh sistem V-Ti-Cr i V-Fe [Radiation-induced structural phase transformations in alloys of the V-Ti-Cr and V-Fe]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novyye materialy – Problems of atomic science and technology. Series: Material science and new materials*, 2008, vol. 72, no. 3, pp. 151–156.
14. Sapnar K.B., Bhoraskar V.N., Dhole S.D., Garadkar K.M., Ghule L.A. Effects of 6 MeV electron irradiation on ZnO nanoparticles synthesized by microwave method. *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference*. New York, 2011, pp. 2166–2168.
15. Loginova M.V., Filimonov V.Yu., Yakovlev V.I., Sytnikov A.A., Negodyaev A.Z., Shreifer D.V. Analysis of the influence of high temperature synthesis parameters on the structure formation in the mechanically activated 3Ti + Al powder mixture. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 117–122. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.117
16. Popova A.A., Sobachkin A.V., Nazarov I.V., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Sitnikov A.A., Sharafutdinov M.R., Lyakhov N.Z. Dynamic diffractometry of phase transformations during high-temperature synthesis in mechanically activated powder systems in the thermal explosion mode. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2013, vol. 77, iss. 2, pp. 120–122. doi: 10.3103/S1062873813020275
17. Pavlinich S.P., Zaitsev M.V. Primeneniye intermetallidnykh titanovykh splavov pri lit'e uzlov i lopatok GTD s oblegchennymi vysokoprochnymi konstruktsiyami dlya aviatsionnykh dvigatelei novykh pokolenii [Application of intermetallic titanitic alloys in parts and gas-turbine engine blade castings with lightweight high-strength constructions of new aircraft engine generations]. *Vestnik UGATU – Bulletin of USATU*, 2011, vol. 15, no. 4 (44), pp. 200–202.
18. Leyens C., Peters M., eds. Titanium and Titanium Alloys: fundamentals and applications. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2003. 532 p. ISBN 978-3-527-30534-6

Article history:

Received 8 July 2015

Revised 17 August 2015

Accepted 20 October 2015