

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ $\beta$ -СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-Nb МЕХАНИЧЕСКИМ СПЛАВЛЕНИЕМ В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

© 2017

**Ж.Г. Ковалевская**, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер, доцент

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск (Россия)  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск (Россия)*

**М.А. Химич**, инженер, аспирант

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск (Россия)  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск (Россия)*

**М.А. Корчагин**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник

*Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск (Россия)  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск (Россия)*

**Ю.П. Шаркеев**, доктор физико-математических наук, профессор,

заведующий лабораторией физики наноструктурных биокомпозитов, профессор

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск (Россия)  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск (Россия)*

*Ключевые слова:* механическое сплавление; шаровая мельница;  $\beta$ -сплав Ti-Nb; медицинские имплантаты.

*Аннотация:* На основе исследований методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного микроанализа, рентгеноструктурного анализа строения и фазового состава порошков системы Ti-Nb, полученных механическим смешиванием и сплавлением компонентов в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице АГО-2С, а также справочных данных об их физических и механических свойствах разработана феноменологическая модель взаимодействия Ti и Nb в процессе механического сплавления. Порошки смешивались в соотношениях Ti-40 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb в течение 5, 10, 15, 20 и 25 минут в водоохлаждаемой камере мельницы.

В зависимости от времени обработки, форма, размер, морфология поверхности частиц и фазовый состав порошков меняются. При изменении времени смешивания от 5 до 20 минут формируются частицы, размер которых меняется в интервале 2–100 мкм. При 25 минутах смешивания порошок измельчается. В процессе смешивания и сплавления формируется механокомпозит, состоящий из зерен двух фаз – пересыщенного твердого раствора  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -TiNb. При смешивании в течение 20 минут порошка Ti-40 мас. % Nb компоненты полностью растворяются друг в друге, и формируется одна неравновесная фаза –  $\beta$ -TiNb. При перемешивании порошка Ti-45 мас. % Nb однофазное состояние достигается за 15 минут. Предложенная феноменологическая модель процесса механического сплавления Ti и Nb предполагает два этапа взаимодействия исходных компонент и формирования метастабильного твердого раствора  $\beta$ -TiNb. Получение механическим сплавлением однофазных сплавов системы Ti-Nb, а также понимание закономерностей их образования расширяет возможности применения данных материалов для производства медицинских имплантатов.

### ВВЕДЕНИЕ

Механическое сплавление в высокоэнергетических шаровых мельницах является разновидностью твердофазного механохимического синтеза. В основе лежит процесс взаимодействия частиц порошка исходных компонентов сплава между собой, с движущимися рабочими телами и внутренними стенками емкости мельницы, приводящий к нагреву, пластической деформации исходных частиц, их измельчению, перемешиванию, свариванию и образованию в итоге новых частиц сплава [1–4]. Объем запасенной энергии и полнота протекания процесса сплавления зависят от заданных технологических характеристик шаровой мельницы и выбранного режима ее работы [5].

В работе механическое сплавление исследуемых порошков проводилось в планетарной шаровой мельнице АГО-2С лаборатории химического материаловедения Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (г. Новосибирск). Шаровая мельница АГО-2С – один из немногих механоактиваторов, в котором процесс сплавления идет быстро – в течение 10 минут, заканчиваясь полным перемешиванием и соединением компонентов [5].

В качестве компонентов применялись чистые порошки Ti и Nb, при сплавлении формирующие одно-

фазные  $\beta$ -сплавы, используемые в биомедицине [6–8]. Их физико-механические характеристики, прежде всего низкий модуль упругости и биоинертные свойства, определяют применение  $\beta$ -сплавов в производстве медицинских имплантатов [9]. Получение таких сплавов на основе порошков Ti и Nb в планетарных шаровых мельницах исследовалось в ряде работ [10–13]. Однако процессы взаимодействия исходных компонент и дальнейшего формирования однофазного сплава в них рассмотрены не были.

Цель представленной работы – получение в планетарной шаровой мельнице  $\beta$ -сплавов системы Ti-Nb, исследование их строения и разработка феноменологической модели взаимодействия Ti и Nb в процессе механического сплавления.

### МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения сплава использовались порошки технически чистого титана и ниобия. Порошок Ti состоял из  $\alpha$ -фазы – низкотемпературной модификации Ti с ГПУ кристаллической решеткой [14]. Порошок ниобия состоял из  $\beta$ -фазы с ОЦК кристаллической решеткой, характерной для равновесного состояния технически чистого Nb [14]. Компоненты смешивались в двух

пропорциях: к титану добавлялось 40 (Ti-40Nb) и 45 % ниобия (Ti-45Nb). Здесь и далее указывается массовый процент компонентов.

Механическое смешивание осуществлялось в планетарной шаровой мельнице АГО-2С с водяным охлаждением в защитной атмосфере аргона с центробежным ускорением шаров  $400 \text{ м/с}^2$ . В качестве агента, контролирующего процесс, использовался этиловый спирт. Время смешивания выбиралось с учетом имеющихся данных о механической активации технически чистого Nb и составило от 5 до 25 минут [15; 16].

Исследование морфологии, структуры, элементного состава получаемых порошков проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионного микроанализа (ЭДМА) на микроскопах SEM 515 и LEO EVO 50. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 в монокроматическом  $\text{CoK}\alpha$ -излучении в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН (г. Томск), ЦКП «Лаборатория электронной микроскопии» НГТУ (г. Новосибирск), ИХТТМ СО РАН (г. Новосибирск).

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе механического смешивания порошки Ti и 40 % Nb взаимодействуют между собой, формируя агломераты, размер и форма которых зависит от времени обработки (рис. 1).

В интервале времени смешивания от 5 до 20 минут формируются частицы с размером от 2 до 100 мкм и бимодальным распределением размера частиц. Первый пик приходится на интервал от 20 до 40 мкм, второй – от 70 до 90 мкм. Это показывает, что процесс дробления и агломерации частиц окончательно не уравнивается [14].

При малом времени смешивания – 5 минут – преобладает процесс интенсивной пластической деформации и «затираания» частиц Ti и Nb друг в друга с формированием объединенных частиц чешуйчатой формы (рис. 1 а). По данным ЭДМА и РСА, в процессе смешивания формируется механокомпозит, состоящий из зерен двух фаз – пересыщенного твердого раствора  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -TiNb [14]. Уширение пиков указывает одновременно на микрораскажение решетки фаз и уменьшение размера кристаллитов.

Дальнейшее увеличение времени смешивания от 10 до 20 минут приводит к агломерации порошка (рис. 1 б).

Частицы порошка образуются за счет соединения все большего числа деформированных фрагментов частиц исходных компонентов. Степень пластической деформации до момента разрушения агломератов определяется условиями протекания процесса деформации. При механической активации в шаровой мельнице создаются условия интенсивной пластической деформации, сопровождающейся релаксационными процессами диффузионного и сдвигового типа [5]. Процесс агломерации начинает преобладать над процессом разрушения. Как следствие, с увеличением времени обработки увеличивается средний размер получившихся частиц порошка (рис. 2) и наблюдается налипание порошкового материала к стенкам барабана.

По данным РСА, одновременно происходит диспергирование микроструктурных элементов и увеличение доли  $\beta$ -фазы. При времени активации 20 минут рентгеноструктурно наблюдается полное растворение компонентов друг в друге с формированием сплава с одной неравновесной фазой  $\beta$ -TiNb.

Самые значительные изменения по форме и размеру получаемого порошка связаны со временем смешивания 25 минут. Порошок измельчается (рис. 1 в). Нивелируется бимодальный характер распределения размера частиц. Одновременно снижается разброс гранулометрического состава (рис. 2). Происходит уравнивание процесса агломерации и дробления частиц порошка. Процесс механического сплавления входит в стадию равновесия.

Увеличение в составе сплава доли Nb до 45 % принципиально не изменяет характера формирования порошка. В исследованном диапазоне времени смешивания от 10 до 20 минут наблюдается увеличение среднего размера частиц, что обусловлено преобладанием процесса агломерации над процессом разрушения. За время активирования 20 минут, как и в сплаве Ti-40Nb, частицы не достигают сбалансированного размера.

При механическом сплавлении порошка Ti-45Nb рентгеноструктурно однофазное состояние сплава достигается за 15 минут. Следовательно, при увеличении в смешиваемых порошках доли Nb процесс формирования однофазного сплава происходит раньше.

На основе проведенных исследований и справочных характеристик компонентов была разработана феноменологическая модель взаимодействия Ti и Nb в процессе

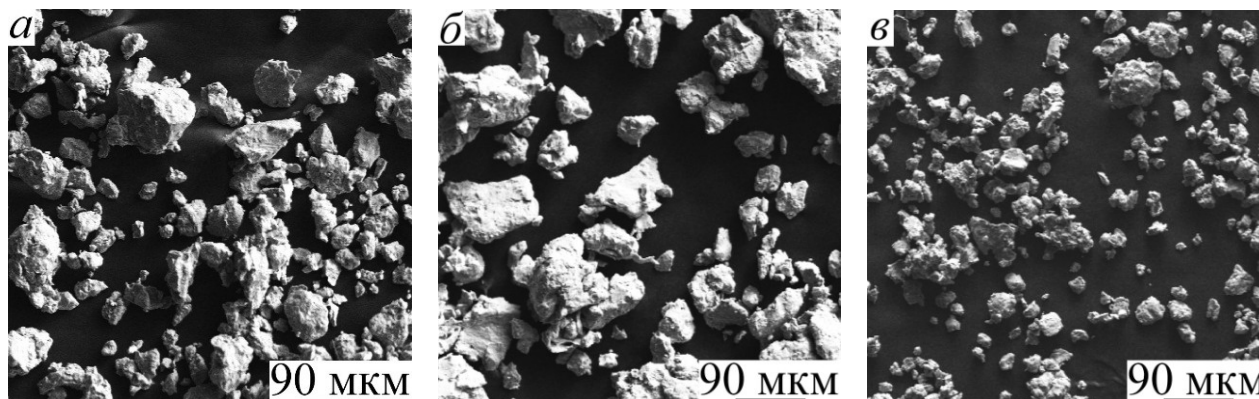
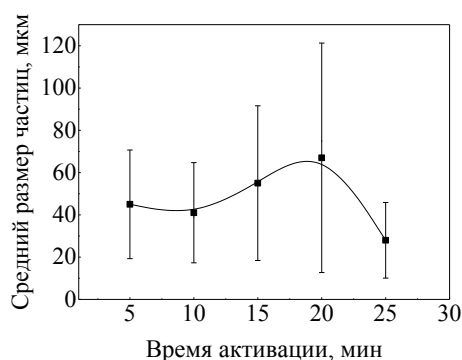


Рис. 1. РЭМ изображение порошка Ti-40Nb после механического сплавления в течение 5 (а), 15 (б), 25 (в) минут

механического сплавления. При создании феноменологической модели механического сплавления авторы опирались на работы П.Ю. Бутягина, Е.П. Елсукова и И.В. Повстугара, в которых представлена модель формирования двойных сплавов на основе Fe с широкой группой легирующих компонентов [17; 18]. В основе взаимодействия компонентов и их реакционной способности в процессе механического сплавления лежит величина их предела текучести, отражающая пластические свойства. Авторы указывают, что соотношение механических свойств компонентов оказывается не менее важным для процесса фазообразования, чем такие параметры, как соотношение размеров атомов и энтальпия смещения, определяющие величину взаимной диффузии и задающие условия формирования твердых растворов и интерметаллидов [5].



**Рис. 2.** Средний размер частиц порошка Ti-40Nb, в зависимости от времени механического сплавления

Сравнивая все вышеприведенные параметры и показатели компонентов исследуемого сплава, можно констатировать известный факт, что Ti и Nb имеют одинаковый атомный радиус, близкие друг другу модули упругости и предел текучести. Энтальпия смещения в системе Ti-Nb составляет +2 кДж/моль. Следовательно, при образовании сплава атомы, имеющие сродство по атомному радиусу и значению модуля упругости, будут легко заменять в кристаллической решетке друг друга без значительных локальных искажений. При этом оба компонента будут одновременно растворимыми и растворяющимися. Можно предположить, что проникновение атомов Ti в решетку  $\beta$ -Nb будет предпочтительней, так как у Ti существует такая же модификация кристаллической решетки. В любом случае растворимость обоих компонентов в решетке другого при механической активации может значительно превышать равновесную, соответствующую диаграмме состояния [19].

Близкие значения предела текучести компонентов дают основание предположить, что при интенсивной пластической деформации в условиях механической активации будет осуществляться одновременная деструкция части кристаллитов обоих компонентов с синхронным проникновением их освободившихся атомов в решетку друг друга [20].

Процесс механического сплавления порошка  $\beta$ -сплава Ti-Nb можно представить следующим образом. На первом этапе сплавления, после механического

помола, интенсивно деформированный материал представляет собой активированные наноразмерные фрагменты  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Nb с общими границами. В этот момент на границе наночастиц происходит поатомное растворение двух компонентов сплава друг в друге до возможных равновесных концентраций. При растворении Ti в Nb это 48 % Ti, при растворении Nb в Ti – 5 % Nb [19]. В результате на первом этапе сплавления часть наноразмерных фрагментов механокомпозита превращается в общий твердый раствор  $\beta$ -TiNb, а часть – в твердый раствор Nb в  $\alpha$ -Ti.

На втором этапе сплавления дальнейшая активация приводит к переходу от равновесного состояния кристаллической решетки к метастабильному. За счет этого продолжается растворение Nb в  $\alpha$ -Ti, что приводит к обратному полиморфному превращению  $\alpha$ -Ti в метастабильный  $\beta$ -TiNb с неравновесной концентрацией Ti. В ранее образовавшихся зернах  $\beta$ -TiNb содержание Ti увеличивается до неравновесной концентрации 55 или 60 %, в зависимости от его содержания в сплавленном порошке. Формирование метастабильных фаз в процессе механического сплавления более предпочтительно, потому что они имеют более низкий барьер энергии активации зарождения, чем стабильные равновесные фазы. В результате на втором этапе сплавления все наноразмерные фрагменты структуры приобретают однофазное состояние – метастабильный твердый раствор  $\beta$ -TiNb.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Механическим смешиванием в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице получены  $\beta$ -сплавы Ti-40Nb и Ti-45Nb. Разработана феноменологическая модель взаимодействия компонентов сплава при их механическом смешивании и сплавлении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение механическим сплавлением однофазных сплавов системы Ti-Nb, а также понимание закономерностей их образования расширяет возможности применения данных материалов в аддитивных технологиях для дизайна, разработки и производства медицинских имплантатов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 15-19-00191.*

*Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suryanarayana C. Mechanical alloying and Milling // Progress in Materials Science. 2001. Vol. 46. P. 1–184.
2. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 3. С. 203–216.
3. Бутягин П.Ю. Проблемы и перспективы развития механохимии // Успехи химии. 1994. Т. 63. № 12. С. 1031–1043.
4. Кузьмич Ю.В., Колесникова И.Т., Серба В.И., Фрейдлин Б.М. Механическое легирование. М.: Наука, 2005. 213 с.

5. Григорьева Т.Ф., Барина А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. Новосибирск: Параллель, 2008. 309 с.
6. Zhuravleva K., Scudino S., Khoshkhoo M.S., Gebert A., Calin M., Schultz L., Eckert J. Mechanical Alloying of β-Type Ti-Nb for Biomedical Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2013. Vol. 15. № 4. P. 262–268.
7. Dutkiewicz J., Maziarz W., Jaworska L. Structure of nanocrystalline structure Ti-base alloys obtained by mechanical alloying and ultra-high pressure sintering // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2008. Vol. 18. P. 264–268.
8. Mohammed M.T., Khan Z.A., Siddiquee A.N. Beta Titanium Alloys: The Lowest Elastic Modulus for Biomedical Applications: A Review // *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. 2014. Vol. 8. P. 820–825.
9. Ozaki T., Matsumoto H., Watanabe S., Hanada S. Beta Ti Alloys with Low Young's Modulus // *Materials Transactions*. 2004. Vol. 45. P. 2776–2779.
10. Maziarz W., Lejkowska M., Mchalski A., Dutkiewicz J. Transmission electron microscopy of microstructure of Ti-Nb and Ti-Ta alloys after ball milling at hot consolidation // *Journal of microscopy*. 2006. Vol. 224. P. 42–45.
11. Giffoni Y.A., Ramos E.C.T., Sandim H.R.Z., Pacheco M.T.T., Silva G., Ramos A.S. Structural evaluation of mechanically alloyed Ti-Nb powders // *Materials Science Forum*. 2008. Vol. 591-593. P. 141–146.
12. Giffoni Y.A., Ramos E.C.T., Sandim H.R.Z., Pacheco M.T.T., Silva G., Ramos A.S. Preparation of Ti-40Nb powders by high-energy milling // *Materials Science Forum*. 2005. Vol. 498-499. P. 146–151.
13. Zhuravleva K., Bönisch M., Scudino S., Calin M., Schultz L., Eckert J., Gebert A. Phase transformations in ball-milled Ti-40Nb and Ti-45Nb powders upon quenching from the β-phase region // *Powder Technology*. 2014. Vol. 253. P. 166–171.
14. Ковалевская Ж.Г., Шаркеев Ю.П., Корчагин М.А., Химич М.А., Ибрагимов Е.А., Сапрыкин А.А., Батаев В.А. Исследование строения порошкового сплава Ti-40Nb, полученного механической активацией // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2016. № 4. С. 34–42.
15. Ditenberg I.A., Tyumentsev A.N., Denisov K.I., Korchagin M.A. Peculiarities of the formation of high-defect states in mechanocomposites and powders of niobium and aluminum under severe deformation in planetary ball mills // *Physical Mesomechanics*. 2013. Vol. 16. P. 84–92.
16. Дитенберг И.А., Денисов К.И., Тюменцев А.Н., Корчагин М.А., Корзников А.В. Особенности микроstructures и упрочнения Nb после механической активации и последующей консолидации кручением под давлением // *Известия ВУЗов. Физика*. 2014. Т. 57. № 7. С. 68–75.
17. Елсуков Е.П., Дорофеев Г.А. Механическое сплавление бинарных систем Fe-M (M = C, Si, Ge, Sn). Кинетика, термодинамика и механизм атомного перемешивания // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2002. Т. 10. № 1-2. С. 59–68.
18. Бутягин П.Ю., Повстугар И.В. О реакционной способности твердых тел в процессах механохимического синтеза // *Доклады академии наук*. 2004. Т. 398. № 5. С. 635–638.
19. Moffat D.L., Kattner U.R. The Stable and Metastable Ti-Nb Phase Diagrams // *Metallurgical Transactions A*. 1988. Vol. 19A. P. 2389–2397.
20. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

#### REFERENCES

1. Suryanarayana C. Mechanical alloying and Milling. *Progress in Materials Science*, 2001, vol. 46, pp. 1–184.
2. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. *Russian Chemical Reviews*, 2006, vol. 75, no. 3, pp. 177–189.
3. Butyagin P.Yu. Problems and perspectives of mechanochemistry development. *Uspekhi khimii*, 1994, vol. 63, no. 12, pp. 1031–1043.
4. Kuzmich Yu.V., Kolesnikova I.T., Serba V.I., Freydin B.M. *Mekhanicheskoe legirovanie* [Mechanical alloying]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 213 p.
5. Grigoreva T.F., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. *Mekhanokhimicheskiiy sintez v metallicheskih sistemakh* [Mechanochemical synthesis in metallic systems]. Novosibirsk, Parallel Publ., 2008. 309 p.
6. Zhuravleva K., Scudino S., Khoshkhoo M.S., Gebert A., Calin M., Schultz L., Eckert J. Mechanical Alloying of β-Type Ti-Nb for Biomedical Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 262–268.
7. Dutkiewicz J., Maziarz W., Jaworska L. Structure of nanocrystalline structure Ti-base alloys obtained by mechanical alloying and ultra-high pressure sintering. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2008, vol. 18, pp. 264–268.
8. Mohammed M.T., Khan Z.A., Siddiquee A.N. Beta Titanium Alloys: The Lowest Elastic Modulus for Biomedical Applications: A Review. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2014, vol. 8, pp. 820–825.
9. Ozaki T., Matsumoto H., Watanabe S., Hanada S. Beta Ti Alloys with Low Young's Modulus. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45, pp. 2776–2779.
10. Maziarz W., Lejkowska M., Mchalski A., Dutkiewicz J. Transmission electron microscopy of microstructure of Ti-Nb and Ti-Ta alloys after ball milling at hot consolidation. *Journal of microscopy*, 2006, vol. 224, pp. 42–45.
11. Giffoni Y.A., Ramos E.C.T., Sandim H.R.Z., Pacheco M.T.T., Silva G., Ramos A.S. Structural evaluation of mechanically alloyed Ti-Nb powders. *Materials Science Forum*, 2008, vol. 591-593, pp. 141–146.
12. Giffoni Y.A., Ramos E.C.T., Sandim H.R.Z., Pacheco M.T.T., Silva G., Ramos A.S. Preparation of Ti-40Nb powders by high-energy milling. *Materials Science Forum*, 2005, vol. 498-499, pp. 146–151.
13. Zhuravleva K., Bönisch M., Scudino S., Calin M., Schultz L., Eckert J., Gebert A. Phase transformations in ball-milled Ti-40Nb and Ti-45Nb powders upon quenching from the β-phase region. *Powder Technology*, 2014, vol. 253, pp. 166–171.
14. Kovalevskaya Zh.G., Sharkeev Yu.P., Korchagin M.A., Khimich M.A., Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Bataev V.A. Investigation of the structure of Ti-40Nb powder alloy

- obtained with mechanical activation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2016, no. 4, pp. 34–42.
15. Ditenberg I.A., Tyumentsev A.N., Denisov K.I., Korchagin M.A. Peculiarities of the formation of high-defect states in mechanocomposites and powders of niobium and aluminum under severe deformation in planetary ball mills. *Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, pp. 84–92.
  16. Ditenberg I.A., Denisov K.I., Tyumentsev A.N., Korchagin M.A., Korznikov A.V. Features of microstructure and hardening of Nb after mechanical activation and subsequent consolidation by torsion under pressure. *Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 937–944.
  17. Elskov E.P., Dorofeev G.A. Mechanical alloying of binary Fe-M (M = C, Si, Ge, Sn) systems. Kinetics, thermodynamics and mechanism of atomic mixing. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 1-2, pp. 59–68.
  18. Butyagin P.Yu., Povstugar I.V. About reactivity of solids in the processes of mechanochemical synthesis. *Doklady Chemistry*, 2004, vol. 398, no. 4-6, pp. 196–199.
  19. Moffat D.L., Kattner U.R. The Stable and Metastable Ti-Nb Phase Diagrams. *Metallurgical Transactions A*, 1988, vol. 19A, pp. 2389–2397.
  20. Grigoreva I.S., Meylikhova E.Z. *Fizicheskie velichiny* [Physical values]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.

### SPECIAL ASPECTS OF FORMATION OF Ti-Nb SYSTEM $\beta$ -ALLOYS BY THE MECHANICAL ALLOYING IN A HIGH-ENERGY BALL MILL

© 2017

**Zh.G. Kovalevskaya**, PhD (Engineering), Associate Professor, leading engineer, assistant professor  
*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk (Russia)*  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk (Russia)*

**M.A. Khimich**, engineer, postgraduate student  
*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk (Russia)*  
*National Research Tomsk State University, Tomsk (Russia)*

**M.A. Korchagin**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, leading researcher  
*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry*  
*of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk (Russia)*  
*National Research Tomsk State University, Tomsk (Russia)*

**Yu.P. Sharkeev**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,  
Head of Laboratory of physics of nanostructured biocomposites, professor  
*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk (Russia)*  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk (Russia)*

**Keywords:** mechanical alloying; ball mill; Ti-Nb  $\beta$ -alloy; medical implants.

**Abstract:** Using the scanning electron microscopy, energy-dispersive microanalysis, and the X-ray diffraction analysis methods, the authors studied the structure and phase composition of Ti-Nb system powders produced in the result of mechanical mixing and alloying of components in the AGO-2C high-energy planetary ball mill. Based on this study and the study of reference data about physical and mechanical properties of these powders, the authors developed the phenomenological model of Ti and Nb interaction in the process of mechanical alloying. The powders were mixed in the ratios of Ti-40 mas % Nb and Ti-45 mas % Nb during 5, 10, 15, 20 and 25 minutes in the mill water-cooled vial. Depending on the treatment time, the shape, size, particles surface morphology, and the powders phase composition are changed. When changing the mixing time from 5 to 20 minutes, the particles are formed, which size varies in the range of 2–100  $\mu\text{m}$ . When mixing during 25 minutes, the powder is granulated. In the process of mixing and alloying, the mechanocomposite consisting of two phases' grains – the supersaturated solid solution of  $\alpha$ -Ti and  $\beta$ -TiNb is formed. When mixing during 20 minutes, Ti-40 mas % Nb alloy components dissolved completely into each other and one  $\beta$ -TiNb non-equilibrium phase is formed. When mixing Ti-45 mas % Nb powder, the single-phase state is achieved in 15 minutes. The proposed phenomenological model of the process of Ti and Nb mechanical alloying involves two stages of initial components interaction and the  $\beta$ -TiNb metastable solid solution formation. Producing of Ti-Nb system single-phase alloys using mechanical alloying and understanding the principles of their formation expands the feasibility of application of these materials for the production of medical implants.