

ФИЗИКА

УДК 621.762.3
МРНТИ 53.39.31

<https://doi.org/10.47526/2025-2/2524-0080.26>

Измайлов Л.Н.¹, Сағымбекова Э.С.², Аубакирова Д.М.³, Қожахметов Е.А.⁴

¹студент, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: leonplay200415@gmail.com

²докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: esagymbekova@edu.ektu.kz

³PhD, доктор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: daubakirova@edu.ektu.kz

⁴ PhD, доктор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева
(Казахстан, г. Усть-Каменогорск), e-mail: ykozkhakmetov@edu.ektu.kz

РАЗРАБОТКА СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ, С ПОМОЩЬЮ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ NiTiCu
DEVELOPMENT OF SHAPE MEMORY ALLOYS USING HIGH ENERGY MILLING OF NiTiCu BASED
POWDERS
NiTiCu НЕГІЗІНДЕГІ ҰНТАҚТАРДЫ ЖОҒАРҒЫ ЭНЕРГИЯМЕН ҰНТАҚТАУ АРҚЫЛЫ ПІШІНДІ
ЕСТЕ САҚТАЙТЫН ҚОРЫТПАЛАРДЫ ӘЗІРЛЕУ

Аннотация. В работе представлены результаты исследований по разработке сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе системы NiTiCu с использованием метода высокоэнергетического измельчения порошков. Целью исследования является получение микро-структурированных материалов с улучшенными функциональными свойствами, такими как высокая температурная стабильность, низкий гистерезис фазового перехода и повышенная циклическая долговечность. Метод высокоэнергетического измельчения позволяет достичь однородного распределения компонентов и формирования микро-размерной структуры, что способствует оптимизации фазовых превращений и улучшению механических характеристик сплавов. Проведены исследования влияния параметров измельчения, таких как время обработки и энергия воздействия, на микроструктуру, фазовый состав и функциональные свойства полученных материалов. Результаты демонстрируют перспективность использования высокоэнергетического измельчения для создания сплавов NiTiCu с улучшенными эксплуатационными характеристиками, что открывает новые возможности для их применения.

Ключевые слова: эффект памяти формы, порошковая металлургия, механосинтез, никелид титана, медь, интерметаллические соединения

Abstract. The paper presents the results of studies on the development of alloys with shape memory effect (SME) based on the NiTiCu system using the high-energy powder milling method. The aim of the study is to obtain microstructured materials with improved functional properties, such as high temperature stability, low phase transition hysteresis and increased cyclic durability. The high-energy milling method allows achieving a uniform distribution of components and the formation of a micro-sized structure, which contributes to the optimization of phase transformations and improvement of the mechanical properties of the alloys. The influence of milling parameters, such as processing time and impact energy, on the microstructure, phase composition and functional properties of the obtained materials were studied. The results demonstrate the promise of using high-energy milling to create NiTiCu alloys with improved performance characteristics, which opens up new possibilities for their application.

Keywords: shape memory effect, powder metallurgy, mechanosynthesis, titanium nickelide, copper, intermetallic compounds

Аңдатпа. Жұмыста NiTiCu жүйесі негізінде жоғары энергиялы ұнтақты ұнтақтау әдісімен пішінді есте сақтау әсері бар қорытпаларды (SME) әзірлеу бойынша зерттеулердің нәтижелері берілген. Зерттеудің мақсаты жоғары температура тұрақтылығы, төмен фазалық ауысу гистерезисі және жоғары циклдік төзімділік сияқты жақсартылған функционалдық қасиеттері бар микроқұрылымды материалдарды алу болып табылады. Жоғары энергиялы ұнтақтау әдісі компоненттердің біркелкі таралуына қол жеткізуге және фазалық өзгерістерді оңтайландыруға және қорытпалардың механикалық сипаттамаларын жақсартуға көмектесетін микро өлшемді құрылымды қалыптастыруға мүмкіндік береді. Алынған материалдардың микроқұрылымына, фазалық құрамына және функционалдық қасиеттеріне өңдеу уақыты мен әсер ету энергиясы сияқты ұнтақтау параметрлерінің әсері бойынша зерттеулер жүргізілді. Нәтижелер

өнімділік сипаттамалары жақсартылған NiTiCu қорытпаларын жасау үшін жоғары энергиялы фрезерлеуді қолданудың әлеуетін көрсетеді, оларды қолданудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Негізгі сөздер: пішінді есте сақтау эффектісі, ұнтақ металлургиясы, механикосинтез, титан никелиді, мыс, металаралық қосылыстар

Введение

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) представляют собой особый класс функциональных материалов, обладающих способностью возвращаться к исходной геометрии после пластической деформации при нагреве до определённой температуры. Данное явление обусловлено обратимым мартенситным фазовым превращением. Наиболее широко применяемыми являются сплавы на основе никелида титана (NiTi), поскольку они характеризуются высокой стабильностью свойств, устойчивостью к коррозии и биосовместимостью [1].

Модификация сплавов NiTi, в частности их легирование медью (Cu), позволяет регулировать ключевые эксплуатационные характеристики [2, 3]. Введение Cu способствует уменьшению температурного гистерезиса фазового перехода, увеличению циклической стойкости и улучшению температурной стабильности. Эти свойства делают сплавы системы NiTiCu перспективными для использования в медицине, аэрокосмической отрасли и микроэлектромеханических системах.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния высокоэнергетического измельчения на микроструктуру, фазовый состав и функциональные характеристики сплавов системы NiTiCu. В рамках исследования анализируются параметры процесса измельчения (время обработки, энергия механического воздействия) и их влияние на формирование дисперсных порошков, обеспечивающих получение материалов с улучшенными свойствами. Полученные данные могут быть использованы при разработке новых композиций сплавов с эффектом памяти формы, отличающихся высокой стабильностью и долговечностью.

Проявление ЭПФ обусловлено фазовым переходом между двумя кристаллическими модификациями: аустенитной (высокотемпературной) и мартенситной (низкотемпературной). Аустенитная фаза характеризуется высокой степенью симметрии атомной решётки (кубическая структура B2), тогда как мартенситная фаза имеет моноклинную структуру (B19'). Переход между этими состояниями происходит бездиффузионным путём, что обеспечивает высокую скорость обратного превращения [4,5].

Ключевым этапом синтеза сплавов с ЭПФ является обеспечение равномерного распределения элементов и гомогенной микроструктуры, поскольку от этих параметров зависят эксплуатационные характеристики материалов. Традиционные методы получения (дуговая плавка, литьё) сопровождаются неоднородностью распределения компонентов и образованием нежелательных фаз. В связи с этим перспективным направлением является порошковая металлургия, в частности, метод высокоэнергетического измельчения, позволяющий получать наноструктурированные порошки с высокой степенью однородности и контролируемым размером частиц [6-8].

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов применяются порошки никеля, титана и меди. Характеристики этих исходных порошков представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исходных порошков

№ п/п	Наименование	Марка	Чистота, %	Размер частиц, мкм
----------	--------------	-------	---------------	-----------------------

1	Порошок никелевый	SY-60820241025	99,8%	<50um(мкм)
2	Титановый металлический порошок	SY-60820241025	99,8%	<50um(мкм)
3	Медный металлический порошок	SY-60820241025	99,8%	<50um(мкм)

В ходе проведения экспериментов были использованы размольные стаканы, емкостью 45 мл, и мелющие шары диаметром 5 мм, из нержавеющей стали марки 1.4125/X105CrMo17. Для определения подходящего размера шара для требуемой конечной тонкости обычно применяется множитель равный примерно 1000. Таким образом, конечная цель-измельчение до 5 мкм, следовательно наиболее подходящий размер шаров составляет 5 мм. Характеристики размольной гарнитуры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики размольной гарнитуры

Наименование Позиции	Характеристика	Твердость	Химический состав, %
Размольный стакан	объем - 45 мл	60 HRC	Fe (81,4), Cr (17), C (1.1), Mo (0,5)
Мелющие шары	диаметр - 5 мм		

В ходе экспериментов изучается, как параметры синтеза—соотношение мелющих шаров к порошку, ускорение и продолжительность процесса—влияют на структуру и свойства порошков системы Ni-Ti-Cu. Подбирая оптимальные параметры, можно добиться большей однородности и стабильности материала.

Скорость вращения планетарной мельницы играет важную роль, и в опытах используются два режима—650 и 750 об/мин. Медь добавляют в сплав, поскольку она улучшает его структуру и механические свойства: снижает гистерезис фазового перехода, стабилизирует температуру мартенситного превращения, повышает коррозионную стойкость и препятствует образованию нежелательной фазы Ti_3Ni_4 .

Механический синтез порошка $NiTi_{45}Cu_{10}$ проводят в течение разного времени—1, 3, 5 и 8 часов—чтобы определить оптимальные условия. Чем дольше идёт обработка, тем лучше распределяются компоненты, но при этом растёт температура, что требует тщательного контроля. Поэтому важно найти баланс между однородностью порошка и сохранением его стабильности.

Так же есть необходимость использования стеариновой кислоты в процессе механосинтеза системы Ni-Ti-Cu связана с риском налипания порошков на мелющие инструменты, что может привести к потерям материала. Опыт работы с металлическими порошками, включая пластичные металлы, показывает, что стеариновая кислота способствует улучшению процесса измельчения. Для оценки её эффективности проводятся два сравнительных синтеза в одинаковых условиях, результаты которых позволяют определить целесообразность её дальнейшего применения [10].

После каждого этапа синтеза порошки будут исследованы современными методами материаловедения для анализа их структуры и свойств.

Результаты и обсуждения

Порошки NiTiCu были измельчены и механосинтезированы в планетарно-шаровой мельнице FRITSCH Pulverisette 7, что при последующем XRD анализе порошков позволило обнаружить новые фазы аустенита (B2) и мартенсита (B19'). Исследование микроструктуры и размера частиц порошков проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN и анализаторе частиц FRITSCH Analysette 22. Новообразованные агломерации после механосинтеза обладают меньшими размерами, а также более стабильной формой.

На рисунке 1 и 2 представлены результаты XRD анализа по времени обработки и по параметрам оборотов в минуту

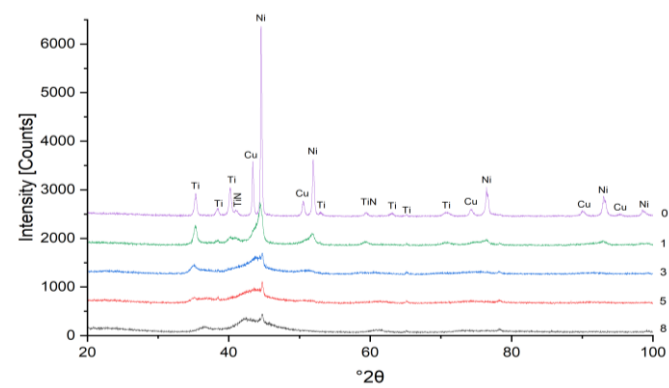


Рисунок 1. Дифрактограмма порошков NiTi45Cu10 после механосинтеза при 750об/мин

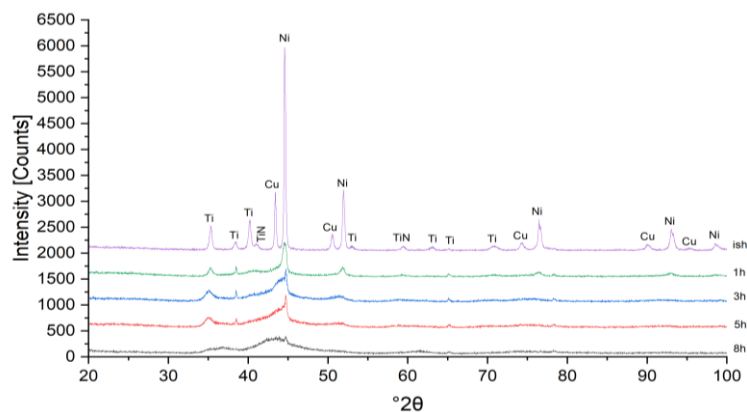


Рисунок 2. Дифрактограмма порошков NiTi45Cu10 после механосинтеза при 650об/мин

Результаты рентгенодифракционного (XRD) анализа порошков, представленные на рисунках 1 и 2, показывают наличие фаз аустенита (B2) и мартенсита (B19'). Наблюдаемый сдвиг по фазе свидетельствует о влиянии времени обработки на фазовые превращения. Увеличение продолжительности измельчения способствует более равномерному распределению фазовых компонентов, что подтверждается анализом дифрактограмм. Так же наблюдается новое фазообразование различных соединений никелида титана (Ni Ti , $\text{Ni}_2 \text{Ti}$, $\text{Ni}_3 \text{Ti}$) и никелида меди (Ni Cu). Такие фазообразования говорят о наличии агломераций, которые в дальнейшую обработку порошка, а именно SPS спеканием, помогут образовать более мелкодисперсный материал, тем самым улучшив свойства сплава. Это подтверждается

при дальнейшем анализе порошка. На рисунке 3 представлена диаграмма распределения размеров частиц после механосинтеза, демонстрирующая снижение среднего размера, с увеличением времени обработки.

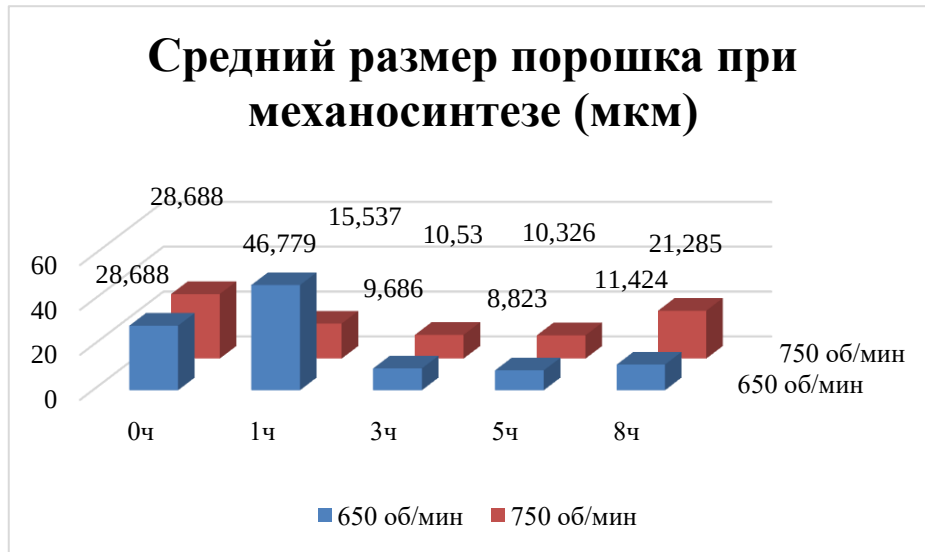


Рисунок 3. Диаграмма распределения размеров порошков после механосинтеза, в зависимости от времени обработки

В проведённом исследовании рассмотрено влияние параметров высокоэнергетической механической обработки, в частности скорости вращения и времени измельчения, на размер и морфологические характеристики порошков, полученных методом механосинтеза. Целью работы являлось выявление закономерностей изменения размеров частиц и формирования агломератов в зависимости от режима обработки. Анализ проводился на основе результатов, представленных в виде диаграммы распределения размеров частиц (рисунок 3) и сканирующих электронных микрофотографий (рисунок 4).

Согласно диаграмме распределения, при скорости вращения 650 об/мин на начальной стадии обработки наблюдается увеличение среднего размера частиц. Этот эффект обусловлен интенсивным холодным свариванием частиц между собой, приводящим к образованию плотных агломератов. Характерной особенностью такого поведения является преобладание коалесценции над фрагментацией, что типично для ранних стадий механосинтеза. По мере увеличения времени обработки до 8 часов наблюдается интенсификация процессов измельчения: агломераты частично разрушаются, и происходит дробление укрупнённых структур на более мелкие фрагменты. Это приводит к уменьшению среднего размера порошков, однако полное устранение агломерации не достигается.

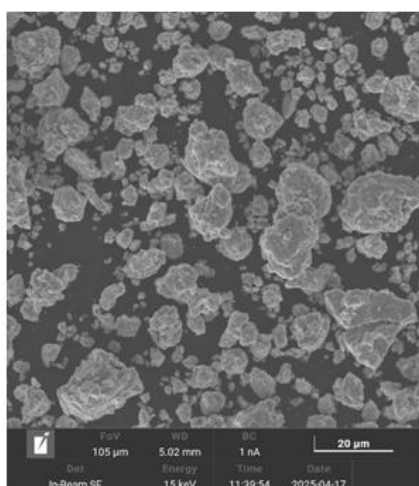
При увеличении скорости вращения до 750 об/мин наблюдается более выраженное снижение размера частиц. Уже на начальных этапах (3–5 часов) достигаются значения порядка 10 мкм, что связано с возрастанием кинетической энергии ударов между шарами и частицами порошка. Однако при увеличении времени обработки до 8 часов вновь фиксируется увеличение размера частиц, что объясняется повторной агломерацией вследствие повышенной энергии взаимодействий. Это указывает на наличие критической продолжительности обработки, после которой процесс измельчения уступает место формированию сваренных агломератов.

СЭМ-изображения, представленные на рисунке 4, подтверждают выводы, сделанные на основании анализа распределения размеров. На микрофотографиях частиц, полученных при обработке со скоростью 750 об/мин, чётко прослеживается динамика изменения морфологии. Через 1 час обработки частицы имеют неправильную форму, присутствуют крупные

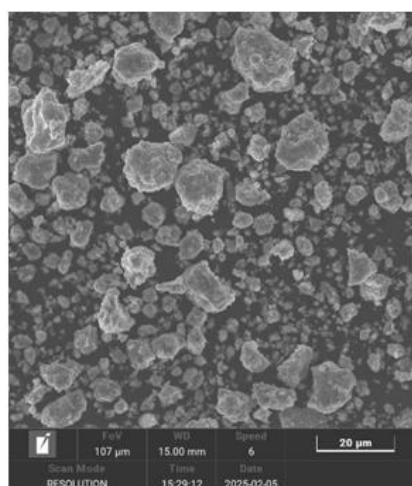
фрагменты и признаки начального агломерирования. После 3 и 5 часов частицы становятся более изометричными, приобретают округлую форму и меньший размер, что свидетельствует об эффективном измельчении и частичном разрушении агломератов. Однако после 8 часов обработки вновь наблюдается увеличение количества агломерированных частиц, что проявляется в виде плотных структур неправильной формы, включающих несколько сваренных между собой частиц.

Аналогичная картина наблюдается при скорости 650 об/мин: в начальной фазе доминируют крупные сваренные частицы, к 5 часу морфология становится более однородной, но к 8 часу снова появляются признаки агломерации. Таким образом, можно заключить, что максимальный эффект диспергирования достигается при промежуточных временных интервалах (3–5 часов), вне зависимости от скорости вращения. Однако более высокая скорость позволяет достигать меньшего среднего размера частиц при том же времени обработки.

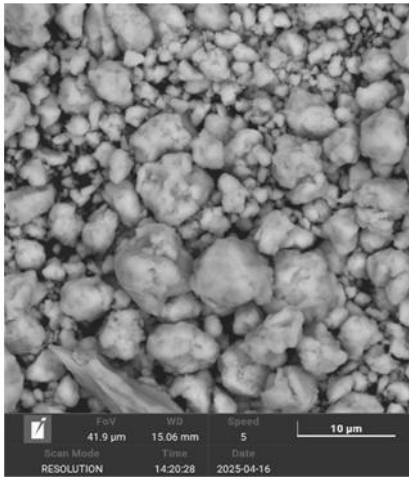
Полученные результаты указывают на ключевую роль времени и интенсивности обработки в механохимических процессах. Слишком короткое время не обеспечивает полного измельчения, а чрезмерно продолжительное вызывает агломерацию и повторное укрупнение частиц. Следовательно, для достижения оптимальной дисперсности порошков необходимо точно подбирать параметры обработки, учитывая критическую границу перехода от измельчения к агломерации. Это имеет особую важность при получении металлгидридов или других функциональных материалов, чувствительных к размеру и морфологии частиц.



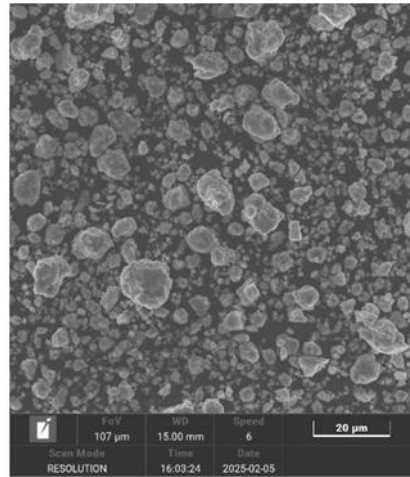
a



b

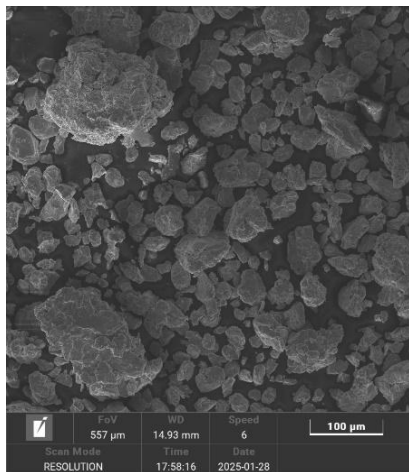


с

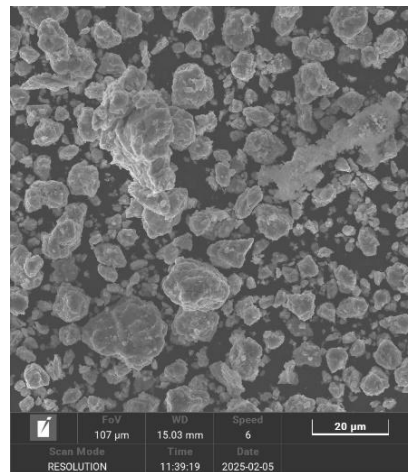


d

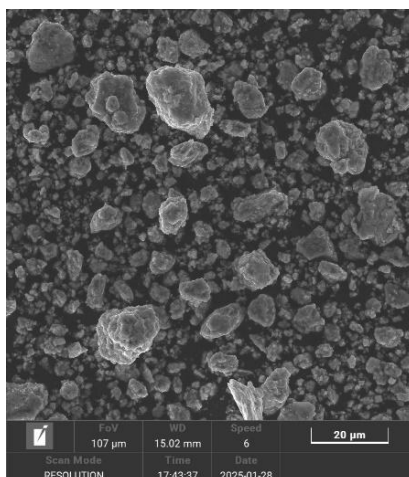
Рисунок 4. СЭМ изображение частиц при 750об/мин, (а)-1ч, (б)-3ч, (с)-5ч, (д)-8ч



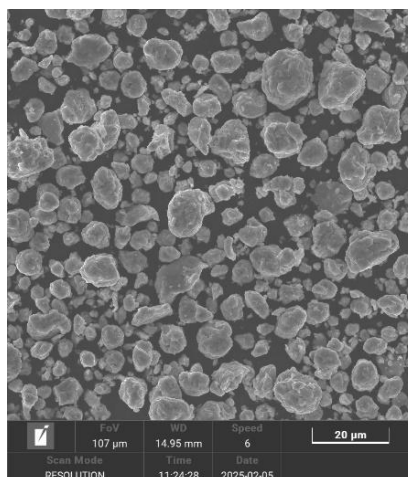
a



b



с



d

Рисунок 5. СЭМ изображение частиц при 650об/мин, (а)-1ч, (б)-3ч, (с)-5ч, (д)-8ч

Заключение

В работе рассматривалось получение, с использованием метода высокоэнергетического измельчения порошков, сплавов с эффектом памяти формы на основе системы NiTiCu. Основная цель работы заключалась в синтезе наноструктурированных материалов с высокой температурной стабильностью, низким гистерезисом фазового перехода и высокой циклической долговечностью. Используемое в работе высокоэнергетическое измельчение в сочетании с механической активацией позволило достичь не только равномерного распределения компонентов, но и формирования наноразмерной структуры, что в свою очередь оптимизирует фазовые превращения и улучшает механические свойства сплавов. Эксперименты показали, что такие параметры, как время и энергия воздействия, имеют придельное значение для соотношения микроструктуры, ее фазового состава, а также функциональных свойств готовых материалов. Результаты XRD и SEM анализа подтвердили наличие аустенитной (B2) и мартенситной (B19') фаз, а также продемонстрировали уменьшение среднего размера частиц с увеличением времени обработки. Снижение размером частиц и повышение их морфологии в целом говорит о высокой эффективности технологии высокоэнергетического дробления для синтеза наноструктурированных порошков.

Легирование медью (Cu) сплавов NiTi показало свое положительное влияние в уменьшении температурного гистерезиса фазового перехода, в увеличении циклической долговечности и температурной стабильности. Это делает NiTiCu сплавы перспективными к области медицины, аэрокосмической техники и микроэлектромеханических систем.

Список использованной литературы

1. Остропико, Е. С. (2018). *Исследование функциональности рабочих элементов с памятью формы: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.04.* СПб, 113.
2. Куранова, Н. Н., Окулов, А. В., Пушин, А. В. и др. (2015). Влияние легирования медью и железом на термоупругие мартенситные превращения и физико-механические свойства сплавов никелида титана с эффектами памяти формы. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, (12), 422–426.
3. Оленева, Ю. Н., Демаков, С. Л., Оленева, О. А. (2015). Разработка легкоплавкого титанового сплава. В *XVI Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Екатеринбург, 7–11 декабря 2015 г.: сборник научных трудов* (Ч. 2, 201–204). Екатеринбург: Издательство Уральского университета..
4. Ильин, А. А., Кудрявцев, А. В., Лебедев, А. А. (2018). Разработка сплавов с эффектом памяти формы. *Научный форум: Инновационная наука*, (6)12. URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018006907>
5. Коновалова, М. А., Ваулина, О. Ю., Скачкова, О. С. (2018). Влияние механической активации на морфологию порошкового никелида титана. В *Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, 26–30 ноября 2018 г.* (С. 351–352). Томск: Изд-во ТПУ.
6. Воеводенко, Д. В. (2022). *Синтез никелида титана методами механического легирования и плазменной сфероидизации, пригодного для использования в аддитивных технологиях: выпускная квалификационная работа магистра: направление 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»; образовательная программа 22.04.01_10 «Материалы и технологические процессы аддитивного производства».* Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
7. Савин, И. Е., Клопотов, А. А., Марченко, Е. С., Гюнтер, В. Э. (2017). Влияние микролегирования Nb и Mo на механические свойства сплава на основе никелида титана. В *Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 27–29 ноября 2017 г.* (С. 104–105). Томск: Изд-во ТПУ.
8. Кунцевич, Т. Э., Пушин, А. В., Пушин, В. Г. (2018). Микроструктура и свойства сплавов на основе никелида титана, полученных быстрой закалкой из расплава. *Институт физики металлов УрО РАН.*

9. Losertová, M., Štencek, M., Matýsek, D., Štefek, O., & Drápala, J. (2017). Microstructure evolution of heat treated NiTi alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 266, 012008.
10. Arunkumar, S., Kumaravel, P., Velmurugan, C., & Senthilkumar, V. (2018). Microstructures and mechanical properties of nanocrystalline NiTi intermetallics formed by mechanosynthesis. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 25, 80–87.
11. Макаров, А. А. (2019). *Исследование неупругих свойств никелида титана с субмикро- и наномасштабными поверхностными слоями, сформированными электронно-ионно-плазменными методами*. Магистерская диссертация, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.
12. Роговенко, Е. С., Фоменко, Е. В., Кухтецкий, С. В. (2022). СЭМ-ЭДС исследование взаимосвязи состава и строения стеклокристаллической оболочки ценосфер энергетических зол. *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*, 15(2), 287–296.
13. Сидоренко, Т. И., Возная, В. И., Белаш, Ю. С., Ермаченко, Е. В. (2022). Автоматический анализ неметаллических включений в стали с помощью электронного микроскопа с энергодисперсионным микроанализатором. *Литье и металлургия*, (1), 64–69.
14. Мухаметжанов, Х., Бекарисов, О. С., Мухаметжанов, Д. Ж., Карибаев, Б. М., Дюсенбаев, Н. Н., Жанаспаев, Т. М. (2021). Научное обоснование использования биокомпозитного материала из гранул пористого никелида титана, обогащенного тромбоцитарной массой, для костной пластики. *Травматология и ортопедия Казахстана*, 60(4), 10–30.
15. Аникеев, С. Г., Кафтаранова, М. И., Ходоренко, В. Н., Артюхова, Н. В., Гарин, А. С., Гюнтер, В. Э. (2020). Влияние добавок титана на структурные особенности пористых материалов на основе никелида титана, полученных методом диффузионного спекания. *Неорганические материалы*, 56(9), 968–974.
16. Хабибова, Е. Д., Чернова, А. П., Семин, В. О. (2022). Исследование коррозионных характеристик сплава никелида титана для медицины. В *Материалы XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени Л. П. Кулёва и Н. М. Кижнера, Томск, 16–19 мая 2022 г., Т. 1*, 456–457.

References

1. Ostropiko, E. S. (2018). *Issledovanie funktsional'nosti rabochikh elementov s pamyat'yu formy: dis. kand. fiz.-mat. nauk: 01.02.04*. SPB.
2. Kuranova, N. N., Okulov, A. V., Pushin, A. V., et al. (2015). Vliyanie legirovaniya med'yu i zhelezom na termouprugie martensitnye prevrashcheniya i fiziko-mekhanicheskie svoystva splavov nikelida titana s effektami pamyati formy. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH*, (12), 422–426.
3. Oleneva, Yu. N., Demakov, S. L., Oleneva, O. A. (2015). Razrabotka legkoplavkogo titanovogo splava. In *XVI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya Uralskaya shkola-seminar metalovedov-molodykh uchenykh. Ekaterinburg, 7–11 dekabrya 2015 g.: sbornik nauchnykh trudov* (Ch. 2, pp. 201–204). Ekaterinburg: Izdatel'stvo Uralskogo universiteta.
4. Ilin, A. A., Kudryavtsev, A. V., Lebedev, A. A. (2018). Razrabotka splavov s эффектом pamyati formy. *Nauchnyy forum: Innovatsionnaya nauka*, (6)12. <https://scienceforum.ru/2018/article/2018006907>
5. Konovalova, M. A., Vaulina, O. Yu., Skachkova, O. S. (2018). Vliyanie mekhanicheskoy aktivatsii na morfologiyu poroshkovogo nikelida titana. In *Perspektivnye materialy konstruksionnogo i meditsinskogo naznacheniya: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy molodezhnoy konferentsii, Tomsk, 26–30 noyabrya 2018 g.* (pp. 351–352). Tomsk: Izd-vo TPU.
6. Voevodenko, D. V. (2022). *Sintez nikelida titana metodami mekhanicheskogo legirovaniya i plazmennoy sferoidizatsii, prigodnogo dlya ispol'zovaniya v additivnykh tekhnologiyakh: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota magistra: napravlenie 22.04.01 "Materialovedenie i tekhnologii materialov"; obrazovatel'naya programma 22.04.01_10 "Materialy i tekhnologicheskie protsessy additivnogo proizvodstva"*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo.
7. Savin, I. E., Klopotov, A. A., Marchenko, E. S., Günter, V. E. (2017). Vliyanie mikrolegirovaniya Nb i Mo na mekhanicheskie svoystva splava na osnove nikelida titana. In *Vysokie tekhnologii v sovremennoy nauke i tekhnike (VTSNT-2017): Sbornik nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, Tomsk, 27–29 noyabrya 2017 g.* (pp. 104–105). Tomsk: Izd-vo TPU.
8. Kuntsevich, T. E., Pushin, A. V., Pushin, V. G. (2018). Mikrostruktura i svoystva splavov na osnove nikelida titana, poluchennykh bystroy zakalkoy iz rasplava. *Institut fiziki metallov UrO RAN*.
9. Losertová, M., Štencek, M., Matýsek, D., Štefek, O., & Drápala, J. (2017). Microstructure evolution of heat treated NiTi alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 266, 012008.

10. Arunkumar, S., Kumaravel, P., Velmurugan, C., & Senthilkumar, V. (2018). Microstructures and mechanical properties of nanocrystalline NiTi intermetallics formed by mechanosynthesis. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 25, 80–87.
11. Makarov, A. A. (2019). *Issledovanie neuprugikh svoystv nikelida titana s submikro- i nanomasshtabnymi poverkhnostnymi sloyami, sformirovannymi elektronno-ionno-plazmennymi metodami* (Magisterskaya dissertatsiya). Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet.
12. Rogovenko, E. S., Fomenko, E. V., Kukhletskiy, S. V. (2022). SEM-EDS issledovanie vzaimosvyazi sostava i stroeniya steklokristallicheskoy obolochki tsenosfer energeticheskikh zol. *Zhurnal SibIrskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*, 15(2), 287–296.
13. Sidorenko, T. I., Voznaya, V. I., Belash, Yu. S., Ermachenok, E. V. (2022). Avtomaticheskii analiz nemetallcheskikh vklyucheniye v stali s pomoshch'yu elektronogo mikroskopa s energodispersionnym mikroanalizatorom. *Lite i metallurgiya*, (1), 64–69.
14. Mukhametzhannov, Kh., Bekarisov, O. S., Mukhametzhannov, D. Zh., Karibaev, B. M., Dyusenbaev, N. N., Zhanaspaev, T. M. (2021). Nauchnoe obosnovanie ispol'zovaniya biokompozitnogo materiala iz granul poristogo nikelida titana, obogashchennogo trombotsitarnoy massoy, dlya kostnoy plastiki. *Travmatologiya i ortopediya Kazakhstana*, 60(4), 10–30.
15. Anikeev, S. G., Kaftaranova, M. I., Khodorenko, V. N., Artyukhova, N. V., Garin, A. S., Günter, V. E. (2020). Vliyaniye dobavok titana na strukturnye osobennosti poristyykh materialov na osnove nikelida titana, poluchennykh metodom diffuzionnogo spekaniya. *Neorganicheskie materialy*, 56(9), 968–974.
16. Khabibova, E. D., Chernova, A. P., Semin, V. O. (2022). Issledovanie korrozionnykh kharakteristik splava nikelida titana dlya meditsiny. In *Materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh imeni L. P. Kulyova i N. M. Kizhera, Tomsk, 16–19 maya 2022 g.*, 1, 456–457.

Авторлар туралы мәліметтер

№	Аты-жөні, ғылыми дәрежесі, жұмыс немесе оқу орны, қала, ел, автордың e-mail мекенжайы, ұялы телефон нөмірі
1	Измайлов Л.Н. — студент, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, e-mail: leonplay200415@gmail.com
	Izmailov L.N. — student, East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: leonplay200415@gmail.com
	Измайлов Л.Н. — студент, Восточно-Казахстанского технического университета имени Даулета Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: leonplay200415@gmail.com
2	Сағымбекова Э.С. — докторант, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің VERITAS артықшылық орталығының ғылыми инженері, Өскемен қ., Қазақстан, e-mail: esagymbekova@edu.ektu.kz
	Sagymbekova E.S. — doctoral student, research engineer of the CE VERITAS the East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: esagymbekova@edu.ektu.kz
	Сағымбекова Э.С. — докторант, инженер-исследователь ЦП «VERITAS» Восточно-Казахстанского технического университета имени Даулета Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: esagymbekova@edu.ektu.kz
3	Аубакирова Д.М. — PhD, доктор, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, e-mail: daubakirova@edu.ektu.kz
	Aubakirova D.M. — PhD, doctor of the International School of Engineering of the East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: daubakirova@edu.ektu.kz
	Аубакирова Д.М. — PhD, доктор, Международной школы инженери Восточно-Казахстанского технического университета имени Даулета Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: daubakirova@edu.ektu.kz
4	Қожахметов Е.А. — PhD, доктор, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің VERITAS артықшылық орталығының жетекшісі, Өскемен қ., Қазақстан, e-mail: ykozkhakmetov@edu.ektu.kz
	Kozhakhmetov Y.A. — PhD, doctor, Head of the CE "VERITAS" of the East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: ykozkhakmetov@edu.ektu.kz
	Қожахметов Е.А. — PhD, доктор, руководитель ЦП «VERITAS» Восточно-Казахстанского технического университета имени Даулета Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: ykozkhakmetov@edu.ektu.kz