

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-05>

УДК 620.187:621.7

EDN EADCIL


Оригинальная статья / Original paper



Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании
никелида титана

А.П. Дмитриева¹  , М.Э. Бузоверя^{1,2} 

¹Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ г. Саров, Нижегородская обл.,
Российская Федерация

²Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация
 dmiitr4@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время для производства никелида титана нового поколения, обладающего уникальными свойствами памяти формы и сверхэластичности, все чаще применяют метод аддитивных технологий, в частности метод селективного лазерного плавления. Этот подход позволяет создавать изделия сложной геометрической формы, которые практически невозможно получить традиционными методами обработки металлов. Однако, несмотря на очевидные преимущества этого метода, существует острая необходимость в детальном изучении влияния параметров селективного лазерного плавления на формирующуюся микроструктуру, механические свойства и другие характеристики никелидов титана. В качестве образцов для исследования использовались нетравленные полированные микрошлифы никелида титана, полученные методом селективного лазерного плавления. В работе представлены результаты исследования методом атомно-силовой микроскопии особенностей структуры образцов никелида титана до и после термической обработки. Применение данного метода дало возможность получить количественные данные о топографии поверхности с высоким разрешением. Измерены размеры зерен, включений и мартенситных пластин на микро- и наноуровне. Выявлена прямая связь типа структуры с микромеханическими характеристиками, такими как деформация и модуль упругости. Показано, что методология, основанная на атомно-силовой микроскопии с привлечением дополнительных экспериментальных методов и статистической обработкой данных, может быть положена в основу высокоточной диагностики структурно-фазового состояния сплавов. Для атомной отрасли это имеет первостепенное значение, так как позволяет не только дополнять традиционный металлографический анализ, но и получать уникальные данные о поведении материала на наноуровне. Эта информация крайне необходима для обоснования длительной работоспособности изделий в условиях интенсивного ионизирующего излучения и высоких термомеханических нагрузок, обеспечивая тем самым требуемый уровень надежности и безопасности эксплуатации ответственного оборудования.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, никелид титана, селективное лазерное плавление, эффект памяти формы

Для цитирования: Дмитриева А.П., Бузоверя М.Э. Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании никелида титана. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):44–51. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-05>


For citation: Dmitrieva A.P., Buzoverya M.E. Evaluation of atomic microscopy potential in the study of titanium nickellides. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-05>

Evaluation of atomic microscopy potential in the study of titanium nickellides

Anastasia P. Dmitrieva¹  , Marina E. Buzoverya^{1,2} 

¹Sarov Institute of Physics and Technology the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation

²Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov,
Nizhny Novgorod region Russian Federation

 dmiitr4@yandex.ru

Abstract. Currently, additive manufacturing techniques, in particular selective laser melting, are increasingly being used to produce a new generation of titanium nickelide with unique shape memory and superelastic properties. This approach allows the creation of products with complex geometric shapes that are virtually impossible to obtain using traditional metalworking methods. However, despite the obvious advantages of this method, there is an urgent need for a detailed study of the influence of selective laser melting parameters on the forming microstructure, mechanical properties, and other characteristics of titanium nickelides. Unetched polished micro-sections of titanium nickelide obtained by selective laser melting are used as samples for the study. The paper presents the results of a study using atomic force microscopy of the structural features of titanium nickelide samples before and after heat treatment. The application of this method made it possible to obtain quantitative data on the surface topography with high resolution. The sizes of grains, inclusions, and martensitic plates are measured at the micro- and nano-levels. A direct correlation between structure type and micromechanical characteristics such as deformation and elastic modulus is identified. It is shown that a methodology based on atomic force microscopy with the use of additional experimental methods and statistical data processing can be used as the basis for high-precision diagnosis of the structural and phase state of alloys. This is of paramount importance for the nuclear industry, as it not only complements traditional metallographic analysis, but also provides unique data on the behavior of materials at the nanoscale. This information is essential for substantiating the long-term operability of products under conditions of intense ionizing radiation and high thermomechanical loads, thereby ensuring the required level of reliability and safety in the operation of critical equipment.

Keywords: atomic force microscopy, titanium nickelide, selective laser melting, shape memory effect

Введение

Никелид титана (TiNi) является перспективным материалом для атомной энергетики благодаря своей способности к «памяти формы» и высокой коррозионной стойкости и прочности. Его применение включает изготовление деталей для активных зон ядерных реакторов и сопутствующего оборудования, так как этот сплав может выдерживать экстремальные условия эксплуатации, обеспечивая надежность и безопасность установок. Отличительная особенность сплава – способность при нагревании восстанавливать форму после пластической деформации – позволяет использовать TiNi для создания систем автоматики, например, предохранительных клапанов, датчиках температуры, замках и робототехнике [1,2].

Уровень служебных свойств никелида титана во многом определяется технологией его получения. К примеру, сформированная в процессе мегапластической деформации кручением в никелиде титана ультрамелкозернистая и субмикроструктурная

структура позволяет повысить комплекс функциональных свойств (с 4,2 до 10,2%) по сравнению с кованными образцами [3,4]. Другим перспективным направлением получения изделий с субмикронной и наноструктурой являются аддитивные технологии (АТ).

Никелид титана, исследованный в данной работе, представляет собой материал нового поколения, так как был получен методом селективного лазерного плавления (СЛП), который является одним из основных методов аддитивных технологий. Механические свойства таких образцов в полной мере определяется фазовыми и структурными превращениями, происходящими в сплаве как непосредственно после синтеза, так и в ходе последующей термообработки. Характерной особенностью титановых сплавов является наличие полиморфных превращений, приводящих к значительным изменениям структуры и свойств в зонах термического воздействия. В случае технологии СЛП высокоэнергетическое лазерное воздействие

приводит к нагреву материала до температур, значительно превышающих точку фазового перехода, с последующим очень быстрым охлаждением. При этом происходит превращение из высокотемпературной β -фазы (аустенит В2) в α -фазу (мартенсит В19/В19'). Возможны и образования других метастабильных фаз в зависимости от тепловой истории [5,6].

Стремительное развитие аддитивных технологий, основанных на высокоэнергетическом воздействии (таких как селективное лазерное плавление, электронно-лучевая плавка), требует современных подходов к выбору методов диагностики их влияния на структуру и свойства материалов [7–9]. Классическим и хорошо зарекомендовавшим себя методом в этой области является оптическая металлография. Ее возможностей, как правило, достаточно для определения таких характеристик, как средний размер зерна, наличие пор и макронеоднородностей. В дополнении к оптической металлографии, имеющей давнюю историю, в данном исследовании использован современный метод атомно-силовой микроскопии.

Поэтому, целью работы является применение АСМ для исследования структурно-фазового состояния и микромеханических свойств образцов никелида титана, полученных СЛП.

Выбор метода АСМ основан на его уникальных возможностях, позволяющих на одном образце получать комплексную информацию как о топографии поверхности (структуре), так и о локальных механических свойствах на микро- и наноуровне. Это дополняет результаты металлографического анализа и дает принципиально новые данные о материале.

Образцы и методы исследования

В качестве образцов исследования использовались нетравленные микрошлифы никелида титана (TiNi), изготовленные по 3D-технологии, методом селективного лазерного плавления. Состояние и процентное содержание гафния в образцах представлено в таблице 1.

Таблица 1. Образцы исследования¹

Table 1. Study samples

Номер образца	Состояние образцов	% содержания Hf
1	После синтеза, исходное	2,5
2	После синтеза, исходное	5,5
3	Термообработка: нагрев на платформе построения T=850°C	4,0

Образцы исследовались на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next производства НТ-МДТ, Россия, г. Зеленоград. Сканирование поверхности проводилось в нескольких модах: в полуконтактной моде (tapping-mode) в режиме топографии и фазы на воздухе при нормальных условиях. Микромеханические свойства снимались в контактной моде методом силовой спектроскопии. В данных измерениях использовались кремниевые кантилеверы серии NSG10/TiN. Обработка изображений проводилась с помощью штатного программного обеспечения «ImageAnalysisP9». Измерения проводились на 3-х образцах по 27 измерений для каждой области.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Топографические измерения

На рисунке 1 представлены характерные АСМ-изображения поверхности образцов, полученных в режиме топографии. Анализ морфологии поверхности показал, что образцы в исходном состоянии имеют выраженную мартенситную структуру, то есть игольчатую и пластинчатую. После термической обработки структура меняется: появляются области с распадом зерна и с выделением мелкодисперсных частиц. Следует отметить, что даже на нетравленном материале нам удалось визуализировать основные структурные составляющие сплава.

Оценка состояния поверхности

Программное обеспечение микроскопа позволяет оцифровывать и измерять структурные параметры материалов. На первом

¹ Образцы были предоставлены специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ (И.В. Пикунин).

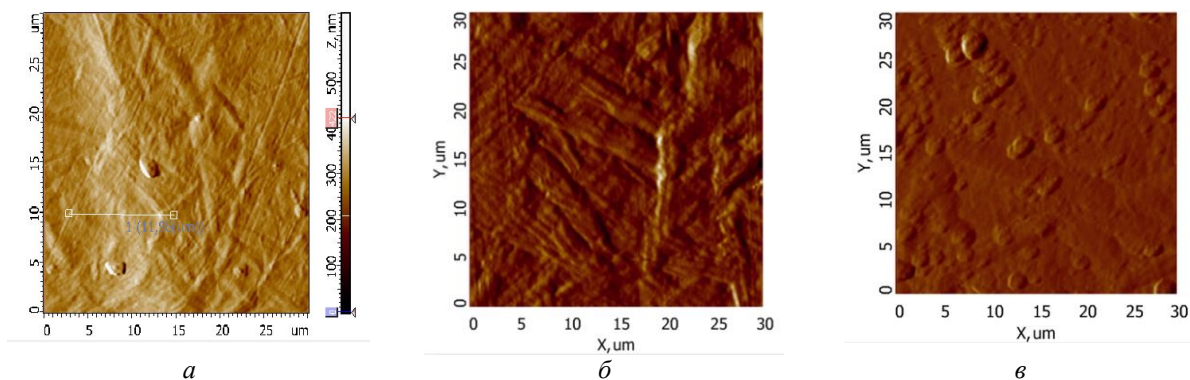


Рисунок 1. АСМ-изображения поверхности образцов, размер скана 30x30 мкм: а – образец 1; б – образец 2¹; в – образец 3

Figure 1. AFM-image of the samples surface, scan scale 30x30 nm: a – sample 1; b – sample 2¹; c – sample 3

уровне оценка состояния поверхности образцов проводилась с помощью режима Simple statistic, которая дает возможность измерять параметры микрорельефа поверхности. Результаты, представленные в таблице 2, показали, что на панорамных сканах размером 30x30мкм, разница в значениях шероховатости не обнаружена, а на сканах 5x5мкм образец с пластинчатыми образованиями имеет повышенную шероховатость.

Таблица 2. Параметры шероховатости
Table 2. Roughness parameters

№ образца	Шероховатость, нм	
	30x30 мкм	5x5 мкм
1	18,173	2,435
2	16,883	6,671
3	15,928	3,880

Следующий этап оценки состояния поверхности образцов проводился с помощью режима Section Analysis, который позволяет провести измерения структурных элементов сплава. Анализ морфологии поверхности образца 1 и профилей сечения показал, что в рамках аустенитных зерен происходит распад с выделением внутри зерна колонии мартенситных игл и α -фазы по границам. Согласно классификации титановых сплавов по типу структуры образец 1 можно отнести к сплаву с β -превращенной структурой².

На всех сканах разного размера морфология образца 2 имеет пластинчатый тип. Пример измерения структурных элементов представлены на рисунке 2.

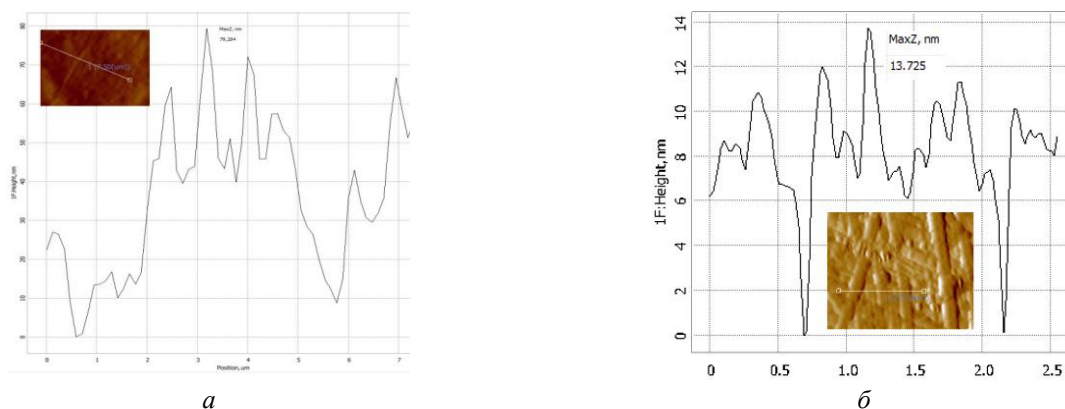


Рисунок 2. Профиль сечения с фрагментом АСМ-изображения: а – образца 1; б – образца 2
Figure 2. Section profile with fragment of AFM-image: a – sample 1; b – sample 2

¹ Рисунок 1б опубликован ранее в статье «Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании TiNi» сборник трудов конференции «МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ», Саров, 09–11 апреля 2025 года. Саров: ООО «Интерконтакт», 2025. 104-105 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82964988> (дата обращения: 20.10.2025)

² Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов. Учебное пособие, Красноярск, 2007. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-669.017%3A669.2+%2F.8%2F%D0%9C+540-669860> (дата обращения: 20.10.2025).

На поверхности образца 3 после термической обработки присутствуют области распада мартенсита, которые визуализируются на сканах 10x10мкм (рис. 3). В результате распада мартенсита на границах и в теле зерна наблюдаются мелкодисперсные включения белого цвета. Полученные нами данные согласуются с результатами работы [10],

где подобные структуры идентифицированы как фазы $TiNi_3$ и Ti_2Ni . Эти фазы могут упрочнять сплав. Однако, большое количество промежуточных фаз, их неравномерное распределение повышают хрупкость титанового сплава и могут ухудшать их служебные свойства.

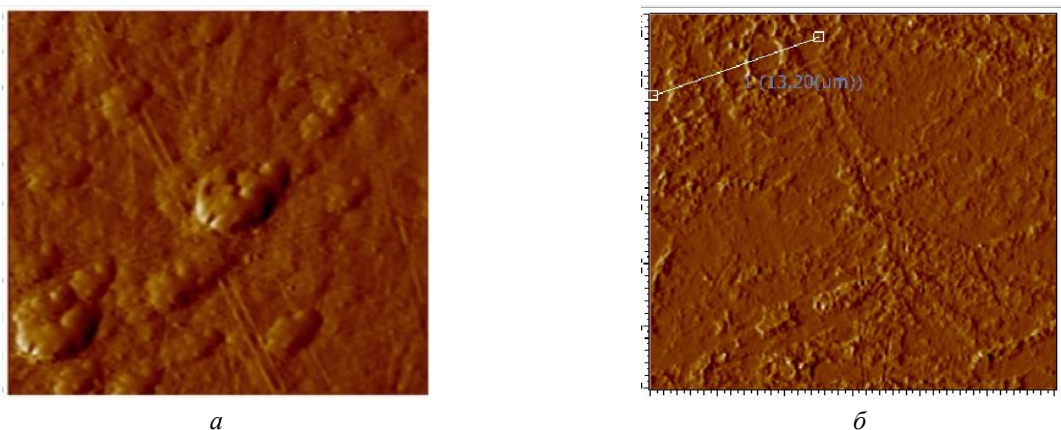


Рисунок 3. Фрагмент АСМ-изображения размером 10x10, образец 3: а³ – топография; б – фаза
Figure 3. Fragment of AFM-image scale 10x10 nm, sample 3: a³ – topography; b – phase

Результаты измерений основных структурных элементов образцов 1–3 представлены в таблице 3.

Таблица 3. Средние значения размеров структурных составляющих $TiNi$

Table 3. Average values of structural components $TiNi$

Размер, мкм	Зерно, мкм	Иглы, мкм	Вторичная фаза, мкм
Образец 1			
30x30	2,50	1,00	-
10x10	2,00	0,20	-
5x5	0,50	0,10	-
Образец 2			
30x30	0,65	0,35	-
10x10	0,50	0,13	-
5x5	0,19	0,10	-
Образец 3			
30x30	2,50	-	0,40
10x10	1,50	-	0,15
5x5	0,80	0,10 и ниже	0,10
Литературные данные [9]			
	1,00-6,00	0,10-0,90	0,10-4,20

Результаты измерений основных структурных элементов сплава совпадают с данными литературных источников. Таким образом, образцы в исходном состоянии имеют выраженную мартенситную, то есть пластинчато-игльчатую структуру. После термической обработки $TiNi$ появляются области с распадом зерна и с выделением частиц вторичных фаз; на низкоразмерных сканах выявляются мартенситные иглы.

Измерение микромеханических характеристик

Для практического применения материалов с памятью формы определяющее значение имеет модуль Юнга, обладающий высокой чувствительностью к фазовым переходам [11]. Он позволяет регистрировать переходы и изучать влияние на них различных факторов в основном, модуль Юнга определяют классическим методом из кривых «нагрузка-деформация».

³ Рисунок 3а опубликован ранее в статье «Оценка возможностей атомно-силовой микроскопии в исследовании $TiNi$ » сборник трудов конференции «МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ», Саров, 09–11 апреля 2025 года. Саров: ООО «Интерконтакт», 2025. 104–105 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82964988> (дата обращения 20.10.2025)

Методом силовой спектроскопии был получен набор силовых кривых для каждого образца. Измерения позволяют выделить на одном и том же скане области, отличающиеся микромеханическими характеристиками: с высоким модулем Юнга и низкой деформацией; с низким модулем Юнга и высокой

деформацией. Для исходного синтезированного материала модуль Юнга имел низкое значение 1,80 МПа, что указывает на высокую пластичность материала. Для образца после термообработки наблюдался сильный разброс в микромеханических характеристиках (рис. 4).

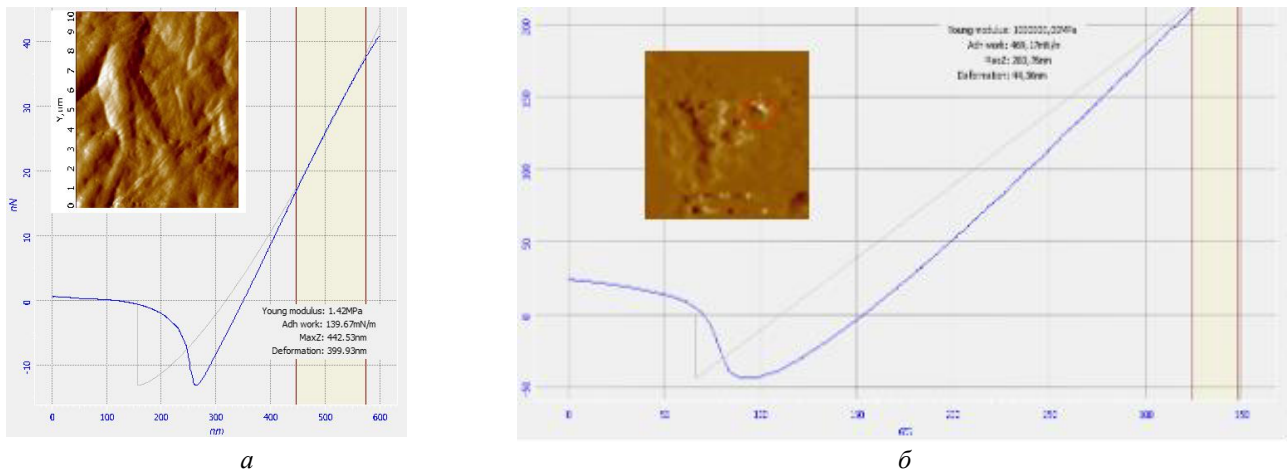


Рисунок 4. Силовые кривые образца 3 с фрагментом области исследования: а – модуль Юнга = 1,43 МПа, деформация = 399,93 нм; б – модуль Юнга = 1000000 МПа, деформация = 44,36 нм
Figure 4. Force curves of the sample 3 with a region fragment: a – Young's module = 1,43 МПа, deformation = 399,93 нм; б – Young's module = 1000000 МПа, deformation = 44,36 нм

Неоднородность микромеханические характеристики материала после ТО, можно объяснить распадом исходной мартенситной структуры. Для поверхности с зеренной структурой модуль составлял 750–1500 МПа. Область распада с включениями в теле зерна характеризуется повышенным модулем ~650400 МПа и выше. Область с мартенситом имеет низкий модуль ~1,50 МПа. Отмечается, что титановые сплавы с мартенситной структурой обладают высокой пластичностью². При нагреве закаленных титановых сплавов происходит распад мартенсита, который сопровождается выделением промежуточных фаз. Модули упругости наименьшие у сплавов с максимально пересыщенным α/α'' -мартенситом и наибольшие при максимальном количестве промежуточной фазы (ω -фаза). Исходя из результатов анализа структуры в режиме фазового контраста (рис. 3), видно, что после термообработки распад мартенсита сопровождается выделением большого количества мелких включений.

Можно сделать вывод, что после термической обработки микромеханические харак-

теристики материала становятся неоднородными по поверхности и могут присутствовать разные фазовые составляющие. Выводы предварительные (исследовались нетравленные образцы) и требуют дальнейшего систематического исследования.

Заключение

В ходе работы на примере никелида титана показана возможность исследования структуры и микромеханических свойств титановых сплавов нового поколения методом АСМ. Рассмотрены особенности титанового мартенсита и структурно-фазовых превращений, происходящих после термообработки сплава на микро- и наномасштабном уровнях.

Показано, что при комплексном исследовании с использованием дополнительных экспериментальных методов и наборе достаточной статистики, на основе АСМ можно отработать методику диагностики структурно-фазового состояния титановых сплавов. Такой подход позволит получить новые данные о материале и дополнить результаты металлургического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Попов Н.Н., Сысоева Т.П., Щедрина Е.В., Пресняков Д.А., Гришин Е.Н. Исследование условий возникновения и реализации эффекта памяти формы в сплаве Ti-Ni-Nb-Zr с целью изучения возможности его использования в устройствах безопасности атомной энергетики. Тезисы докладов Международной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы». Витебск: УО ВГТУ. 2014, С. 78-80. Режим доступа: [elibrary 49913189_99288308.pdf](https://elibrary.49913189.99288308.pdf) (дата обращения: 20.10.2025).

Popov N.N., Sysoeva T.P., Shchedrina E.V., Presnyakov D.A., Grishin E.N. Research of the conditions for the occurrence and realization of the shape memory effect in the Ti-Ni-Nb-Zr alloy in order to study the possibility of its use in safety devices for nuclear energy. Abstracts of the International conference «Shape memory alloys: properties, technologies, and prospects». Vitebsk: Vitebsk state technological university. P. 78-80. (In Russ.). Available at: [elibrary 49913189_99288308.pdf](https://elibrary.49913189.99288308.pdf) (accessed: 20.10.2025).

2. Сплавский И.С. Коррозионная стойкость никелида титана в атмосферных условиях. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021;4:45-49. <https://doi.org/10.31857/S0235711921040143>

Splavskiy I.S. Corrosion Resistance of Titanium Nickelide under Atmospheric Conditions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;50(4):319-323. <https://doi.org/10.3103/S1052618821040142>

3. Богатов Ю.В., Щербачев А.В., Щербачев В.А., Ковалева Д.Ю., Сычева А.Е. Синтез никелида титана методом электротеплового взрыва под давлением. *Неорганические материалы*. 2023;59(10):1185-1191. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23100019>

Bogatov Y.V., Shcherbakov A.V., Shcherbakov V.A., Kovalev D.Y., Sychev A.E. Pressure-assisted electrothermal explosion synthesis of Titanium Nickelide. *Inorganic Materials*. 2023;59(10):1185-1191. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23100019>

4. Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2018. Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции, Москва, 24–26 апреля 2018 года. Москва: ООО «Студио-Принт», 2018. 214 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34911787&ysclid=mkxvrg93k3376939647> (дата обращения 20.10.2025)

Strength of inhomogeneous structures – PROST 2018. Collection of papers from the 9th Eurasian scientific and practical conference, Moscow, April 24–26, 2018. Moscow: Studio-Print LLC, 2018. 214 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34911787&ysclid=mkxvrg93k3376939647> (accessed: 20.10.2025).

5. Полякова К.А., Рыклина Е.П., Полесский С.К. Влияние масштабного фактора на мартенситные превращения и механические свойства никелида титана. Сборник материалов «Бернштейновские чтения – 2024», 2024. 152 с. Режим доступа: https://tmo.misis.ru/docs/2024/tmo_2024.pdf (дата обращения 21.10.2025)

Polyakova K.A., Rykлина E.P., Polesky S.K. Influence of the scale factor on the martensitic transformations and mechanical properties of titanium nickelide: Collection of materials «Bernstein Readings – 2024», 2024. 152p. (In Russ.). Available at: https://tmo.misis.ru/docs/2024/tmo_2024.pdf (accessed: 21.10.2025).

6. Сибирев А.В. Необратимая деформация при многократной реализации эффекта памяти формы в сплаве TiNi. Автореферат диссертации кандидата физико-математических наук. Уфа, 2016. 132 с. Режим доступа: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005553922?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 22.10.2025).

Sibirev A.V. Irreversible deformation during multiple realizations of the shape memory effect in the TiNi alloy. Dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences. Ufa, 2016. 132 p. (In Russ.). Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005553922?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed: 22.10.2025).

7. Кунцевич Т.Э. и др. Микроструктура и свойства сплавов на основе никелида титана, полученного закалкой из расплава. *Письма в журнал технической физики*. 2014. С. 88-94. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27425> (дата обращения 22.10.2025).

Kuntsevich T.E. et al. Microstructure and properties of nickelide-titanium alloys obtained by melt quenching. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2014. P. 88-94. (In Russ.). Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27425> (accessed on 22.10.2025).

8. Шишковский И.В. и др. Создание объемного изделия из никелида титана методом послойного лазерного плавления. *Письма в журнал технической физики*. 2013. С. 15-24. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14679> (дата обращения 22.10.2025).

Shishkovsky I.V. et al. Creation of a three-dimensional titanium nickelide product by layer-by-layer laser melting. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2013. P. 15-24. (In Russ.). Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14679> (accessed 22.10.2025).

9. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава VT6, полученного методом аддитивных технологий. *Авиационные материалы и технологии*. 2020;1;58:38–44. Режим доступа: https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2020/2020_1_5.pdf?ysclid=mjlgтуwvte489193003 (дата обращения 21.10.2025).

Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Research of the formation of the structure of the material of the VT6 titanium alloy obtained by additive technologies. *Aviation Materials and Technologies*. 2020;1;58:38-44. (In Russ.). Available at: https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2020/2020_1_5.pdf?ysclid=mjlgтуwvte489193003 (accessed: 21.10.2025).

10. Пушин В.Г., Прокошкин С.Д., Валиев Р.З. и др. Сплавы никелида титана с памятью формы. Екатеринбург.

бург: УрО РАН, 2006. 438 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603800&ysclid=mlqxbwvy4614557750> (дата обращения: 22.10.2025).

Pushin V.G., Prokoshkin S.D., Valiev R.Z. et al. Shape memory nickelide alloys. Yekaterinburg: Ural branch of the Russian academy of sciences, 2006. 438 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603800&ysclid=mlqxbwvy4614557750> (accessed: 22.10.2025).

11. Казей З.А., Снегирев В.В. Упругие свойства сплавов TiNi с памятью формы с различной термообработкой. *Физика твердого тела*. 2019;61(7):1223-1228. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.07.47828.380>

Kazei Z.A., Snegirev V.V. Elastic Properties of TiNi Shape Memory Alloys Subjected to Various Heat Treatments. *Physics of the Solid State*. 2019;61:1163-1168. <https://doi.org/10.1134/S1063783419070151>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Дмитриева А. П. – ответственный за проведение эксперимента (исследование методом АСМ), участие в анализе и интерпретации результатов, внесение правок в текст статьи, подготовка финальной версии статьи;

Бузоверя М. Э. – руководитель проекта, координация работы, постановка задачи, анализ полученных данных и их интерпретация, проведение литературного отбора, формулировка заключений, внесение правок в текст статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Анастасия Павловна Дмитриева, лаборант кафедры общетехнических дисциплин и электроники, Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0009-0005-1301-8749>

e-mail: dmiiitr4@yandex.ru

Марина Эдуардовна Бузоверя, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ, доцент, Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0009-0006-4481-637X>

e-mail: mebuzzoverya@gmail.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Dmitrieva A. P. – responsible for conducting the experiment (research using the AFM method), participating in the analysis and interpretation of results, editing the text of the article, and preparing the final version of the article;

Buzoverya M. E. – project manager, coordination of work, setting tasks, analysis and interpretation of data, literature review, formulation of conclusions, editing of the article.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anastasia Pavlovna Dmitrieva, laboratory assistant at the Department of General Technical Disciplines and Electronics, Sarov Institute of Physics and Technology the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Sarov, Russian Federation.

<http://orcid.org/0009-0005-1301-8749>

e-mail: dmiiitr4@yandex.ru

Marina Eduardovna Buzoverya, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at RFNC-VNIIEF, Associate Professor, Sarov Institute of Physics and Technology the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Sarov, Russian Federation.

<http://orcid.org/0009-0006-4481-637X>

e-mail: mebuzzoverya@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 27.10.2025

После доработки / Revision 11.02.2026

Принята к публикации / Accepted 17.02.2026