



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Получение прутков и листов из сплава TiNiHf с высокотемпературным эффектом памяти формы методами продольной прокатки и ротационной ковки

Роман Карелин^{a, *}, Виктор Комаров^b, Владимир Черкасов^c, Артем Осокин^d,
 Константин Сергиенко^e, Владимир Юсупов^f, Владимир Андреев^g

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский пр. 49, г. Москва, 119334, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4795-8668>,  rdkarelin@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>,  vickomarov@gmail.com;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-5450-3565>,  cherkasov.vv@misis.ru; ^d  <https://orcid.org/0009-0008-4945-3648>,  art.osokin1201@icloud.com;
^e  <https://orcid.org/0000-0003-4018-4599>,  shulf@yandex.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0002-0640-2217>,  vsyusupov@mail.ru;
^g  <https://orcid.org/0000-0003-3937-1952>,  andreev.icmateks@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.295'24:539.374

История статьи:

Поступила: 07 июля 2025
 Рецензирование: 28 июля 2025
 Принята к печати: 07 августа 2025
 Доступно онлайн: 15 сентября 2025

Ключевые слова:

Сплав с памятью формы
 Прокатка
 Твердость
 Ротационная ковка

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания ИМЕТРАН на 2025 год № 075-00319-25-00.

АННОТАЦИЯ

Введение. Сплавы с памятью формы на основе никелида титана являются функциональными материалами, нашедшими широкое практическое применение в технике и медицине. Для регулирования их функционального поведения и получения материалов со специальными свойствами активно развивается использование тройных сплавов на основе никелида титана, а в особый класс следует выделить сплавы системы TiNiHf, для которых реализация эффекта памяти формы происходит при более высоких температурах. Необходимость получения таких сплавов продиктована потребностями целого ряда отраслей промышленности, требующих создания функциональных элементов из сплавов с памятью формы с температурой срабатывания более 120 °С. Эти сплавы также должны обладать достаточной технологической пластичностью для изготовления деформированных полуфабрикатов и последующего производства термочувствительных элементов. Среди актуальных вопросов развития практического применения сплавов TiNiHf можно также выделить развитие технологии получения полуфабрикатов различного сортамента, связанных с разработкой режимов и схем термомеханической обработки. **Цель работы:** исследование возможности проведения деформационной обработки исследуемых сплавов TiNiHf с высокотемпературным эффектом памяти формы и выявление закономерностей формирования фазового состава и механических характеристик в зависимости от способа обработки. **В работе исследована** возможность получения листов и прутков из сплавов TiNiHf с 5 и 10 ат. % Hf и 50,0 ат. % Ni методами продольной прокатки, прокатки в калибрах и ротационной ковки. **Методами исследования** являлись рентгенографический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия и измерение твердости по Виккерсу. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что сплав TiNiHf с 10 ат. % Hf обладает недостаточной технологической пластичностью. Из сплава с 5 ат. % Hf были получены заготовки в виде листов и прутков различного размера за счет использования процессов продольной прокатки и ротационной ковки. Показано, что проведение горячей деформации позволяет увеличить твердость исследуемого сплава TiNiHf с 5 ат. % Hf по сравнению с литым состоянием с 232 HV до 242...264 HV. Проведение холодной деформации приводит к значительному росту значений твердости, до 362...394 HV. Характеристические температуры протекания прямого и обратного мартенситного превращения достаточно стабильны. На основании результатов исследования можно сделать вывод о перспективности применения продольной прокатки и ротационной ковки для получения полуфабрикатов СПФ TiNiHf с 5 ат. % Hf и повышения функциональных и механических свойств сплава после выплавки.

Для цитирования: Получение прутков и листов из сплава TiNiHf с высокотемпературным эффектом памяти формы методами продольной прокатки и ротационной ковки / Р.Д. Карелин, В.С. Комаров, В.В. Черкасов, А.А. Осокин, К.В. Сергиенко, В.С. Юсупов, В.А. Андреев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 37–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-37-49.

Введение

Сплавы с памятью формы на основе никелида титана являются функциональными материалами, нашедшими широкое практическое применение в технике и медицине благодаря уникальным свойствам памяти формы, высоким механическим характеристикам, коррозионной

*Адрес для переписки

Карелин Роман Дмитриевич, к.т.н.
 Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
 Ленинский пр. 49,
 119334, г. Москва, Россия
 Тел.: +7 916 590-42-76, e-mail: rdkarelin@gmail.com

стойкости и биосовместимости [1–7]. Для регулирования их функционального поведения и получения материалов со специальными свойствами активно развивается использование тройных сплавов на основе никелида титана с добавлением Cu, Fe, Co, Nb, Hf и др. [8–11]. Среди этих сплавов в особый класс следует выделить сплавы системы TiNiHf, для которых характерно проявление высокотемпературного эффекта памяти формы [12–14].

Большинство научных исследований в данной области посвящено сплаву с содержанием 20 ат. % Hf и 50,3 ат. % Ni. За счет применения такого состава сплава может быть обеспечен температурный интервал восстановления формы (ТИВФ) 200...350 °C [15–19]. Высокое содержание Hf (20 ат. %) и Ni (выше 50 ат. %) объясняется тем, что в некоторых исследованиях было показано, как при увеличении суммарной концентрации Ti и Hf выше 49,8 ат. % сплавы системы TiNiHf становятся хрупкими и не могут подвергаться обработке давлением. Причиной возникновения хрупкости является выделение большого количества охрупчивающей фазы типа (Ti, Hf)₂Ni [20]. Из-за этого в исследуемых сплавах обычно повышают концентрацию Ni, и при отсутствии изменений содержания других элементов происходит соответствующее снижение температурного интервала мартенситных превращений. Поэтому для получения высокотемпературного эффекта памяти формы в этих сплавах требуется повышение концентрации Hf. Использование сплава с высоким содержанием Hf приводит к его существенному удорожанию и сдерживает развитие применения данного сплава. Кроме того, оно также сдерживается ограниченными возможностями регулирования температур протекания мартенситных превращений.

На сегодняшний день в ряде отраслей промышленности существует потребность в сплаве с памятью формы, обладающем ТИВФ в диапазоне 120...200 °C и достаточной технологической пластичностью для изготовления термочувствительных элементов. Среди актуальных вопросов развития практического применения сплавов TiNiHf также можно выделить развитие технологии получения полуфабрикатов различного сортамента, связанных с разработкой режимов и схем термомеханической обработки [21].

В частности, в ранее проведенных исследованиях была показана возможность изготовления прутков из сплава Ti_{49,0}Ni_{49,5}Hf_{1,5} методом ротационнойковки с высокими механическими свойствами и температурой конца восстановления формы после наведения 2 % деформации 155 °C [22]. В работе [23] была продемонстрирована возможность использования импульсного электрического тока для увеличения технологической пластичности сплава Ti_{47,4}Ni_{47,6}Hf_{5,0} при холодной прокатке.

Исходя из вышеизложенного, в рамках развития методов получения полуфабрикатов СПФ TiNiHf с пониженной концентрацией Hf и Ni **цель данной работы** заключалась в исследовании возможности проведения термомеханической обработки с использованием различных методов деформации сплавов TiNiHf с 5 и 10 ат. % Hf и 50,0 ат. % Ni, а также в выявлении закономерностей формирования фазового состава и механических характеристик в зависимости от выбранного способа деформации.

В работе исследована возможность получения полуфабрикатов в виде листов и прутков методами продольной прокатки, прокатки в калибрах и ротационнойковки, а также проведено исследование структуры и механических характеристик сплава методами рентгенографического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии и измерения твердости по Виккерсу. К одним из наиболее значимых результатов следует отнести получение из сплава Ti_{45,0}Ni_{50,0}Hf_{5,0} полуфабрикатов в виде полос толщиной 2,2 и 1,0 мм, прямоугольного прутка размерами 6,9×8,5 мм и круглого прутка диаметром 5,1 мм, обладающих высокой твердостью и стабильным фазовым составом.

Материалы и методика исследования

В качестве объекта исследований были выбраны сплавы заданного состава Ti_{45,0}Ni_{50,0}Hf_{5,0} и Ti_{40,0}Ni_{50,0}Hf_{10,0}. В качестве исходных шихтовых компонентов использовали йодидный титан 99,99%-й чистоты, никель марки Н0 99,99%-й чистоты и гафниевую проволоку марки ГФИ-1 диаметром 2,5 мм. Выплавку исходных слитков TiNiHf с 5 и 10 ат. % Hf проводили методом вакуумной электродуговой плавки с 8-кратным переплавом и разливкой в медный водоохлаждаемый

кристаллизатор. Горячую деформацию заготовки проводили методом продольной и сортовой прокатки на стане «Дуо-300», а также методом горячей ротационнойковки при температуре 850 °С. Калибровка стана при сортовой прокатке – «квадрат – квадрат»; изменение стороны квадрата осуществлялось по следующей технологической карте: 19→17→15→13→11→9→8→7→6 мм. Холодную прокатку проводили на стане КВАРТО 110/300.

Исследование температурного интервала протекания прямого и обратного мартенситного превращения (ТИМП) в сплаве после выплавки проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на калориметре Mettler Toledo DSC 3+ со скоростью нагрева и охлаждения 10 °С/мин в интервале температур от 0 до 200 °С. Исследование фазового состава выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении в диапазоне углов 2θ от 35 до 47° [18, 24]. Исследование механических характеристик проводили путем измерения твердости по Виккерсу при комнатной температуре с использованием твердомера LECOM 400-А под нагрузкой 1 Н.

Результаты и их обсуждение

Выплавка исходных слитков СПФ TiNiHf

Общий вид полученных слитков после электронно-лучевой плавки представлен на рис. 1. Масса, размеры и химический состав слитков приведены в табл. 1.

После выплавки было проведено исследование ТИМП в полученных слитках методом ДСК. Характерные калориметрические кривые приведены на рис. 2.



Рис. 1. Фотографии слитков 1 (а), 2 (б) и 3 (в) СПФ TiNiHf после выплавки методом вакуумной электродуговой плавки с 8-кратным переплавом

Fig. 1. Photographs of ingots 1 (a), 2 (b), and 3 (c) of TiNiHf SMA after vacuum arc melting with 8-fold remelting

Результаты ДСК образцов, вырезанных из слитков 1 и 3, показали, что в исследуемом температурном интервале отсутствуют пики как прямого, так и обратного превращения. В слитке 2 температуры начала и конца обратного МП составили 63 и 124 °С соответственно. Такой широкий интервал характерен для литого состояния слитков ввиду возможного наличия внутренних напряжений и ликваций.

На первом этапе для повышения однородности слиток 1 подвергли гомогенизационному отжигу в течение 12 ч в вакууме при температуре 1100 °С. Однако в ходе проведения отжига произошло расплавление слитка, что может быть связано с образованием фаз с меньшей темпе-

Таблица 1

Table 1

Масса, размеры и расчетный состав слитков TiNiHf
Weight, dimensions, and calculated composition of the TiNiHf ingots

№ слитка / Ingot No.	Масса, г / Weight, g	Размеры, ($h \times b \times L$) мм / Dimensions, ($h \times b \times L$) mm	Химический состав / Chemical composition					
			масс. % / mass %			ат. % / at. %		
			Ti	Ni	Hf	Ti	Ni	Hf
1	148,84	9,5×18,1×137,5	28,87	44,23	26,90	40,0	50,0	10,0
2	150,15	10,4×18,5×136,9	36,03	49,06	14,92	45,0	50,0	5,00
3	149,12	9,8×17,8×137,5	28,87	44,23	26,90	40,0	50,0	10,0

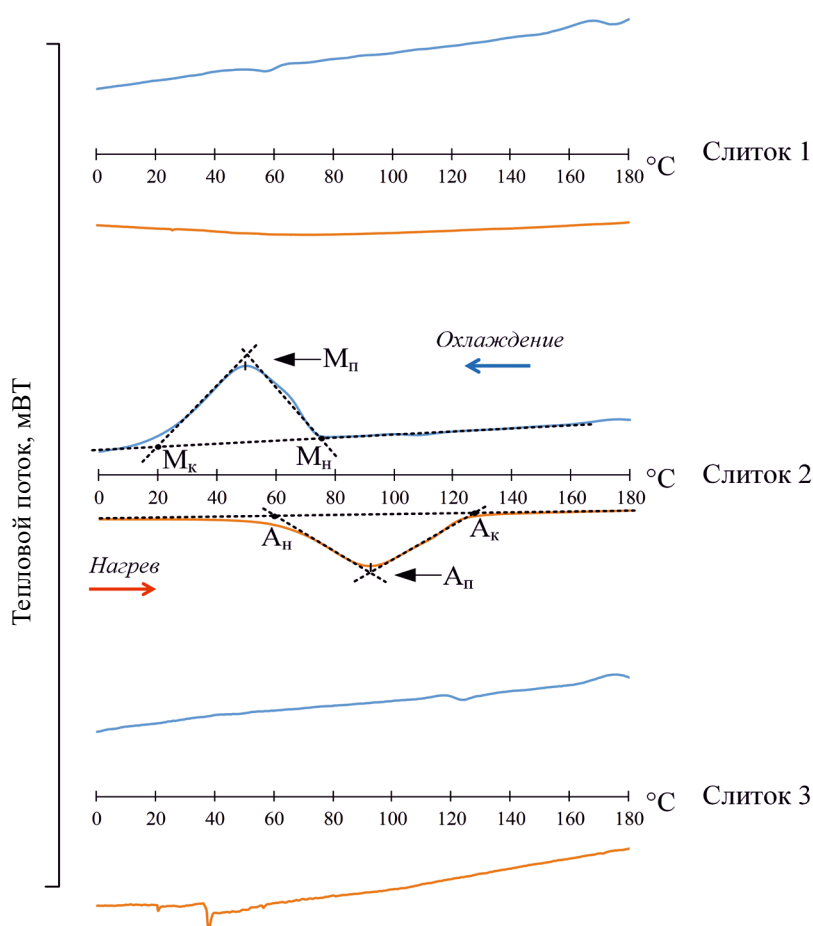


Рис. 2. Калориметрические кривые слитков 1, 2 и 3 СПФ TiNiHf

Fig. 2. Calorimetric curves of ingots 1, 2 and 3 of TiNiHf SMA

ратурой плавления в результате охлаждения после выплавки. Поэтому далее было решено отказаться от этого вида обработки и проводить деформацию слитков 2 и 3 в литом состоянии. Таким образом, с целью оптимизации технологии гомогенизационный отжиг был исключен из технологической схемы получения деформированных полуфабрикатов из СПФ TiNiHf.

Получение полуфабрикатов СПФ TiNiHf

Перед проведением деформации слитки разрезали на две части. Размер заготовок: 2-1 – 10,4×18,5×53,1 мм и 2-2 – 10,4×18,5×77,1 мм; 3-1 – 9,8×17,8×52,1 мм и 3-2 – 9,8×17,8×76,7 мм.

На первом этапе проводили горячую деформацию образцов 2-1 и 3-1 методом продольной прокатки на стане «Дуо-300» при температуре 850 °С с предварительным нагревом в течение 15 минут без защитной атмосферы для повышения технологичности процесса прокатки (так как в ранее проведенных исследованиях нагрев осуществляли в защитной атмосфере аргона

[23]) и с подогревом перед каждым проходом в течение 3...5 минут. Относительная степень деформации за один проход составляла не более 15 %. По результатам проведения горячей прокатки (ГП) из части исходного слитка 2-1 был получен лист с размерами 2,2×27,5×167,9 мм.

Проведение прокатки слитка 3-1 привело к его разрушению уже после второго прохода и накопления относительной степени деформации 12 %. С учетом отсутствия выраженных пиков на калориметрических кривых, расплавления слитка 1 аналогичного состава в процессе гомогенизационного отжига, а также низкой технологической пластичности сплава можно предположить наличие в слитке 3 большого количества нежелательных вторичных фаз, которые могли образоваться в результате охлаждения после выплавки или при нагреве под прокатку. Это позволяет сделать вывод о том, что сплав, содержащий 5 ат. % Hf, обладает большей технологической пластичностью по сравнению со сплавом, содержащим 10 ат. % Hf. Фотографии полученного

листа из слитка 2-1 и слитка 3-1 после разрушения приведены на рис. 3.

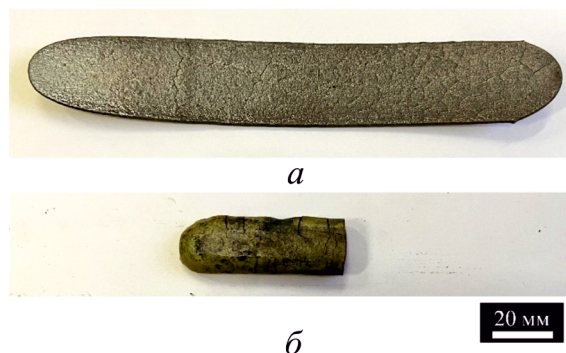


Рис. 3. Фотографии полученного листа из слитка 2-1 сплава толщиной 2,2 мм (а) и слитка 3-1 после разрушения (б)

Fig. 3. Photographs of the obtained sheet from ingot 2-1 (TiNiHf alloy) with a thickness of 2.2 mm (a) and ingot 3-1 after fracture (b)

Дальнейшую деформацию методом горячей сортовой прокатки (ГСП) и ротационной ковки (ГРК) проводили только для слитка 2-2 сплава TiNiHf с 5 ат. % Hf. На первом этапе с одного нагрева проводили прокатку – два прохода в одном калибре, используя эффект деформационного разогрева. Однако при переходе ко второму калибру на заднем конце образца появилась сетка трещин, что может свидетельствовать об узком температурном интервале возможности проведения пластической деформации исследуемого сплава. Поэтому с целью предотвращения захолаживания образца при дальнейшей деформации подогрев осуществляли после каждого прохода.

Изменение схемы прокатки и исключение второго прохода без предварительного подогре-

ва привело к успешному проведению прокатки без разрушения образца или появления дополнительных трещин. В результате после прокатки был получен пруток прямоугольного сечения размерами 6,9×8,5×236,4 мм. После проведения сортовой прокатки от этого прутка отрезали образец длиной 150 мм для проведения ГРК. Ротационную ковку осуществляли при температуре деформации 850 °С с относительной степенью деформации за проход не более 10 % и с подогревом заготовки между каждым проходом в течение 10...15 минут. В результате был получен пруток диаметром 5,1 мм и длиной 119 мм.

Следует отметить, что в отличие от работы [23] исследуемая часть слитка от сплава 2 подвергалась ГРК уже в деформированном, а не в литом состоянии. Это позволяет выявить дополнительную возможность использования сочетания сортовой прокатки и ротационной ковки для получения прутков СПФ TiNiHf. Фотографии прутков после прокатки и ротационной ковки приведены на рис. 4.

Следует отметить, что проведение ротационной ковки сопровождалось сложностями, связанными с заданием прутка при проведении ковки, а также сколами заднего или переднего конца прутка, что было вызвано их захолаживанием при задании. Поэтому ротационную ковку до меньших диаметров, для которых характерны еще большие теплотери, не проводили.

Далее от горячекатаного листа, полученного из слитка 2-1 сплава TiNiHf, был отрезан образец размером 2,1×27,5×56 мм для проведения холодной прокатки (ХП). После резки образцы подвергали очистке от верхнего окисленного

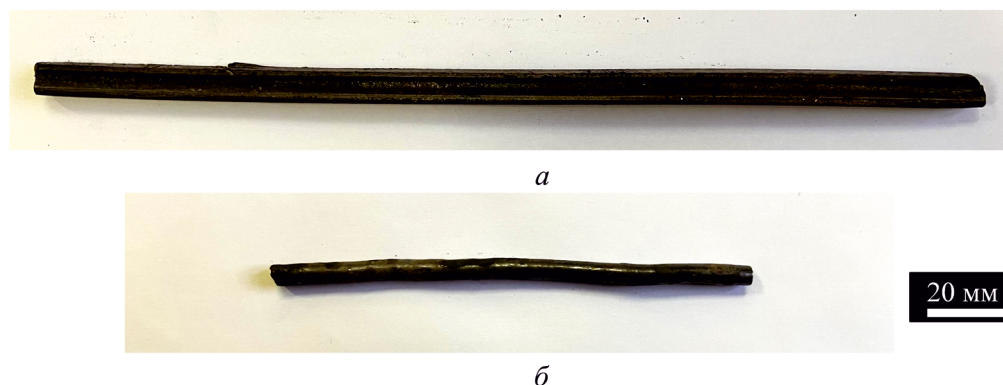


Рис. 4. Фотографии прутка сплава TiNiHf после сортовой прокатки (а) и ротационной ковки (б)

Fig. 4. Photograph of a TiNiHf alloy rod after caliber rolling (a) and rotary forging (b)

слоя методом шлифовки и химического травления в смеси азотной и плавиковой кислоты. В результате толщина листа перед прокаткой составила 2,1 мм. Деформацию методом холодной прокатки осуществляли на стане КВАРТО 110/300 с относительной деформацией за проход не более 10 %. В ранее проведенных исследованиях была определена максимальная степень деформации при холодной прокатке для сплава TiNiHf, которая составляет 20 % [22]. Поэтому холодную прокатку проводили с промежуточными отжигами при температуре 850 °С в течение 10 минут по достижении относительной степени деформации, близкой к 20 %. После холодной прокатки до толщины 1,04 мм от полученного листа был отрезан образец с целью проведения последующей холодной прокатки до разрушения и повторного определения величины критической степени деформации. Общий вид листов до и после холодной прокатки приведен на рис. 5.

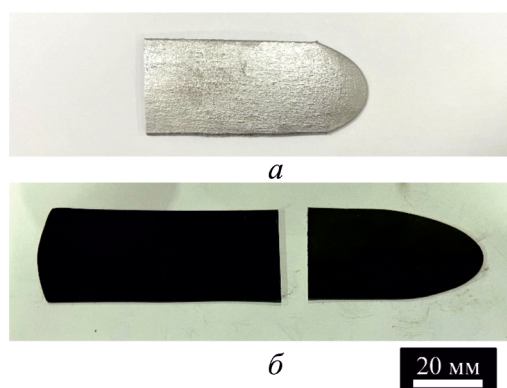


Рис. 5. Общий вид листов СПФ TiNiHf до (а) и после (б) холодной прокатки

Fig. 5. General view of the TiNiHf SMA sheets before (a) and after (b) cold rolling

В результате прокатки образца СПФ TiNiHf до критической степени деформации было установлено, что разрушение образца (появление сквозной трещины на переднем конце образца) произошло после накопления суммарной деформации 23 % при конечной толщине образца 0,93 мм, что еще раз подтверждает необходимость проведения промежуточных отжигов при холодной прокатке образцов сплава TiNiHf по достижении суммарной степени деформации 20 %.

Далее было проведено исследование изменения фазового состава и механических свойств сплава TiNiHf с 5 ат. % Hf в зависимости от используемого способа обработки.

Исследование фазового состояния и механических характеристик образцов СПФ TiNiHf после деформации

Твердость исследуемых образцов слитка 2 сплава TiNiHf после деформации по различным режимам приведена на рис. 6.

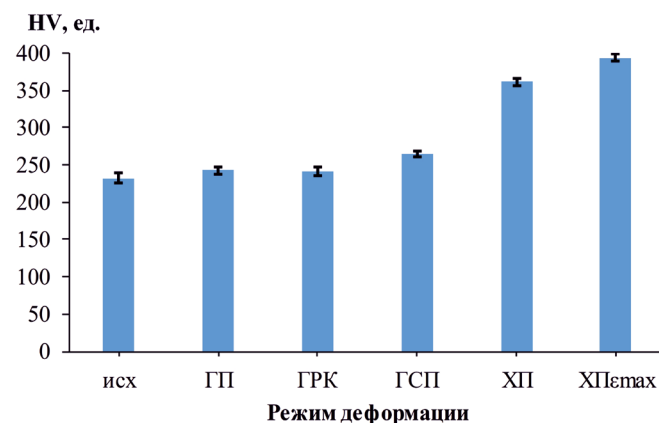


Рис. 6. Твердость образцов СПФ TiNiHf после деформации по различным режимам

Fig. 6. Hardness of TiNiHf SMA samples after various deformation modes

Проведение горячей деформации приводит к небольшому росту твердости по сравнению с исходным состоянием слитка 2 после выплавки (232 HV) – твердость после ГП и ГРК составляет примерно 242 HV, а после ГСП – 264 HV. Такая зависимость характерна для высокотемпературной термической обработки и связана с протеканием процессов динамической и статической рекристаллизации. Проведение холодной деформации методом ХП до толщины 1 мм, в свою очередь, приводит к резкому росту значений твердости до 362 HV, а максимальное значение твердости – 394 HV – было достигнуто после ХП до максимальной степени деформации, приводящей к разрушению образца. Это связано со значительным повышением дефектности кристаллической структуры сплава в результате холодной деформации. Полученные результаты говорят о проведении горячей деформации на установившейся стадии и о протекании процессов динамической рекристаллизации и релаксации внутренних напряжений, вызванных деформационным наклепом, в отличие от ХП, при которой сформированное структурное состояние характеризуется значительным деформационным наклепом.

Результаты рентгенографического анализа исследуемых образцов слитка 2 сплава TiNiHf после деформации по различным режимам приведены на рис. 7.

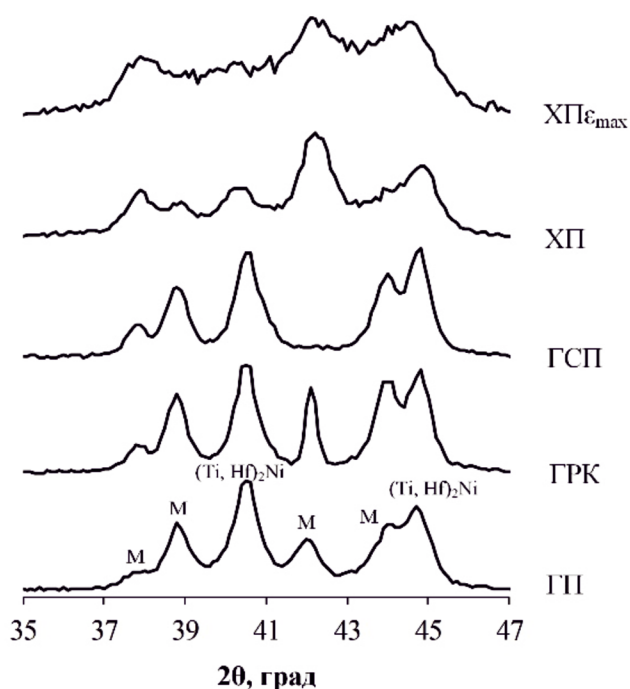


Рис. 7. Рентгенограммы образцов СПФ TiNiHf после исследуемых способов обработки

Fig. 7. X-ray diffraction patterns of TiNiHf SMA samples after the studied processing methods

По результатам рентгенографического анализа можно сделать вывод, что основной фазой в образцах сплава 2 при комнатной температуре до и после деформации является мартенсит. Это полностью коррелирует с данными ДСК. На рентгенограммах отсутствуют линии, соответствующие высокотемпературной фазе В2-аустенита, что подтверждает протекание обратного превращения выше комнатной температуры. В районе углов 41 и 45 2θ также индицируются линии фазы $(\text{Ti, Hf})_2\text{Ni}$, образовавшейся при охлаждении после выплавки. Проведение горячей деформации не приводит к значительному уширению рентгеновских линий, тогда как после холодной прокатки наблюдается их заметное уширение. Изменения профиля линии образца после ХП подтверждает наличие значительного деформационного наклепа и повышение степени дефектности кристаллической структуры в результате данной обработки.

Результаты исследования ТИМП методом ДСК образцов слитка 2 СПФ TiNiHf после исследуемых способов обработки приведены на рис. 8 и в табл. 2. ДСК-кривые слитков СПФ TiNiHf в исходном состоянии представлены на рис. 2.

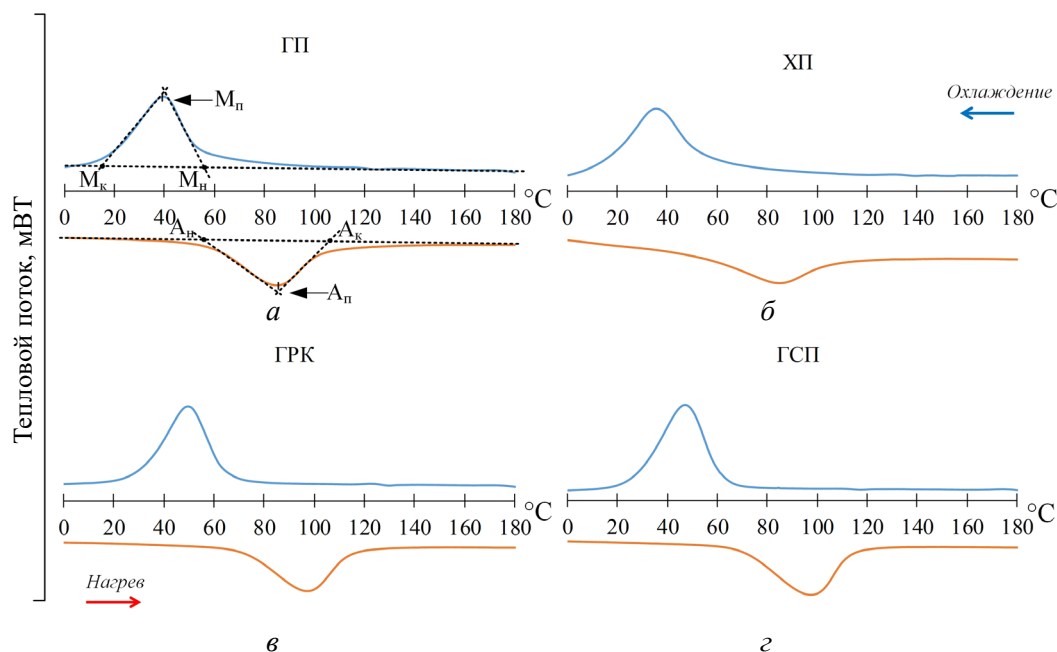


Рис. 8. Калориметрические кривые образцов слитка 2 СПФ TiNiHf после исследуемых способов обработки: ГП (а), ХП (б), ГРК (в) и ГСП (г)

Fig. 8. Calorimetric curves of the samples of ingot 2 (TiNiHf SMA) after the studied processing methods: hot rolling (HR) (a), cold rolling (CR) (б), hot rotary forging (HRF) (в), and hot longitudinal rolling (HLRR) (г)

Таблица 2

Table 2

Характеристические температуры мартенситных превращений образцов слитка 2 СПФ TiNiHf после исследуемых способов обработки

Martensitic transformation temperatures of processed TiNiHf SMA (Ingot 2)

Образец / Sample	Прямое превращение / Direct transformation			Обратное превращение / Reverse transformation		
	$M_n, ^\circ\text{C}$	$M_p, ^\circ\text{C}$	$M_k, ^\circ\text{C}$	$A_n, ^\circ\text{C}$	$A_p, ^\circ\text{C}$	$A_k, ^\circ\text{C}$
Исх. / Initial	74	50	21	62	92	124
ГП / HR	54	40	17	61	85	105
ГРК / HRF	65	50	31	71	97	115
ГСП / HLRR	62	47	27	70	97	113
ХП / CR	54	36	17	52	85	107

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что проведение как горячей, так и холодной деформации не приводит к значительному изменению характеристических температур МП, они достаточно стабильны и их колебания не превышают 10 °С. В то же время наблюдается тенденция снижения температуры конца прямых мартенситных превращений (A_k) по сравнению с исходным состоянием слитка 2 сплава TiNiHf непосредственно после выплавки. При этом указанная температура во всех случаях остается выше 105 °С, что позволяет охарактеризовать данный сплав как высокотемпературный.

Выводы

В работе проведено комплексное исследование возможности получения различных полуфабрикатов из СПФ системы TiNiHf с содержанием 5 и 10 ат. % Hf и пониженным содержанием Ni за счет применения различных способов деформационной обработки. На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Сплав TiNiHf с 10 ат. % Hf обладает недостаточной технологической пластичностью, что не позволяет производить его обработку с помощью рассматриваемых в работе методов деформации.

2. Сплав TiNiHf с 5 ат. % Hf обладает достаточной технологической пластичностью. В результате применения различных способов деформации, включающих в себя горячую и холодную продольную прокатку, сортовую прокатку и ротационную ковку, из сплава

TiNiHf с 5 ат. % Hf были получены качественные полуфабрикаты в виде листов и прутков различного размера.

3. Проведение горячей деформации приводит к росту твердости по сравнению с исходным состоянием после выплавки с 232 HV до 242 HV после ГП и ГРК и до 264 HV после ГСП. Холодная деформация обеспечивает значительное дополнительное увеличение твердости до 362 HV при толщине листа 1 мм и до 394 HV после прокатки до максимальной степени деформации, приводящей к образованию трещин.

4. В целом характеристические температуры протекания прямого и обратного мартенситного превращения достаточно стабильны. Деформация приводит к небольшому (до 19 °С) снижению температуры конца обратного мартенситного превращения (A_k) по сравнению с исходным состоянием слитка TiNiHf с 5 ат. % Hf непосредственно после выплавки. При этом указанная температура во всех случаях остается выше 105 °С, что позволяет классифицировать данные сплавы как высокотемпературные.

5. Результаты исследования говорят о перспективности использования термомеханической обработки методом горячей и холодной прокатки и ротационной ковки для получения полуфабрикатов СПФ TiNiHf с 5 ат. % Hf и повышения функциональных и механических свойств сплава после выплавки.

Список литературы

1. A review on application of shape memory alloys / M. Sadashiva, M.Y. Sheikh, N. Khan, R. Kurbet, T.D. Gowda // International Journal of Recent Technology



and Engineering (IJRTE). – 2021. – Vol. 9 (6). – P. 111–120. – DOI: 10.35940/ijrte.F5438.039621.

2. *Nair V.S., Nachimuthu R.* The role of NiTi shape memory alloys in quality of life improvement through medical advancements: A comprehensive review // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. – 2022. – Vol. 236 (7). – P. 923–950. – DOI: 10.1177/09544119221093460.

3. Shape memory alloy (SMA) actuators: The role of material, form, and scaling effects / M.S. Kim, J.K. Heo, H. Rodrigue, H.T. Lee, S. Pané, M.W. Han, S.H. Ahn // *Advanced Materials*. – 2023. – Vol. 35 (33). – P. 2208517. – DOI: 10.1002/adma.202208517.

4. Features of Ti-Ni alloy structure formation under multi-axial quasi-continuous deformation and post-deformation annealing / I. Khmelevskaya, V. Komarov, R. Kawalla, S. Prokoshkin, G. Korpala // *Materials Today: Proceedings*. – 2017. – Vol. 4 (3). – P. 4830–4835. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.04.079.

5. Effect of temperature-deformation regimes of equal channel angular pressing in core-shell mode on the structure and properties of near-equiatomic titanium nickelide shape memory alloy / R. Karelin, V. Komarov, I. Khmelevskaya, V. Cherkasov, V. Andreev, V. Yusupov, S. Prokoshkin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 1005. – P. 176071. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176071.

6. Effect of post-deformation annealing on structure and properties of nickel-enriched Ti-Ni shape memory alloy deformed in various initially deformation-induced structure states / V. Komarov, R. Karelin, I. Khmelevskaya, V. Yusupov, D. Gunderov // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12 (4). – P. 506. – DOI: 10.3390/cryst12040506.

7. Structure and properties of TiNi shape memory alloy after low-temperature ECAP in shells / R. Karelin, V. Komarov, I. Khmelevskaya, V. Andreev, V. Yusupov, S. Prokoshkin // *Materials Science and Engineering: A*. – 2023. – Vol. 872. – P. 144960. – DOI: 10.1016/j.msea.2023.144960.

8. *Parida J., Mishra S.C.* NiTi-based ternary alloys // *Nickel-Titanium Smart Hybrid Materials*. – Elsevier, 2022. – P. 191–213. – DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00020-1.

9. *Parvizi S., Hashemi S.M., Moein S.* NiTi shape memory alloys: properties // *Nickel-titanium smart hybrid materials*. – Elsevier, 2022. – P. 399–426. – DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00021-3.

10. *Ahmad M.* Effect of ternary element addition on properties of TiNi-based shape memory alloys for engineering and medical applications // *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*. – 2023. – Vol. 36. – P. 7–20. – DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00021-3.

11. *Sampath S., Nguyen T.A.* NiTi-based ternary shape-memory alloys // *Nickel-titanium smart hybrid materials*. – Elsevier, 2022. – P. 123–137. – DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00006-7.

12. *Tong Y., Shuitcev A., Zheng Y.* Recent development of TiNi-based shape memory alloys with high cycle stability and high transformation temperature // *Advanced Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 22. – P. 1900496. – DOI: 10.1002/adem.201900496.

13. Effects of training on the thermomechanical behavior of NiTiHf and NiTiZr high temperature shape memory alloys / O. Karakoc, K.C. Atli, A. Evirgen, J. Pons, R. Santamarta, O. Benafan, R.D. Noebe, I. Karaman // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 794. – P. 139857. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139857.

14. The effect of stress-induced martensite aging in tension and compression on B2-B19' martensitic transformation in $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{32.2}\text{Hf}_{17.5}$ high-temperature shape memory alloy / A.I. Tagiltsev, E.Y. Panchenko, E.E. Timofeeva, Y.I. Chumlyakov, I.D. Fatkullin, E.S. Marchenko, I. Karaman // *Smart Materials and Structures*. – 2021. – Vol. 30 (2). – P. 218–225. – DOI: 10.1088/1361-665X/abdaa8.

15. Nanostructured $\text{Ti}_{29.7}\text{Ni}_{50.3}\text{Hf}_{20}$ high temperature shape memory alloy processed by high-pressure torsion / A. Shuitcev, D.V. Gunderov, B. Sun, L. Li, R.Z. Valiev, Y.X. Tong // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – Vol. 52. – P. 218–225. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.01.065.

16. *Akgul O., Tugrul H.O., Kockar B.* Effect of the cooling rate on the thermal and thermomechanical behavior of NiTiHf high-temperature shape memory alloy // *Journal of Materials Research*. – 2020. – Vol. 35 (12). – P. 1572–1581. – DOI: 10.1557/jmr.2020.139.

17. Thermal expansion of martensite in $\text{Ti}_{29.7}\text{Ni}_{50.3}\text{Hf}_{20}$ shape memory alloy / A. Shuitcev, R.N. Vasin, A.M. Balagurov, L. Li, I.A. Bobrikov, Y.X. Tong // *Intermetallics*. – 2020. – Vol. 125. – P. 106889. – DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106889.

18. Design of a NiTiHf shape memory alloy with an austenite finish temperature beyond 400 °C utilizing artificial intelligence / A.A. Catal, E. Bedir, R. Yilmaz, D. Canadinc // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 904. – P. 164135. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164135.

19. Effects of microstructure and deformation conditions on the hot formability of Ni-Ti-Hf shape memory alloys / J.H. Kim, C.H. Park, S.W. Kim, J.K. Hong, C.S. Oh, Y.M. Jeon, K.M. Kim, J.T. Yeom // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 14. – P. 9548–9553. – DOI: 10.1166/jnn.2014.10191.

20. Effects of cold and warm rolling on the shape memory response of $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{30}\text{Hf}_{20}$ high-temperature shape memory alloy / N. Babacan, M. Bilal, C. Hayretin, J. Liu, O. Benafan, I. Karaman // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 157. – P. 228–244. – DOI: 10.1016/j.actamat.2018.07.009.

21. Processing and scalability of NiTiHf high-temperature shape memory alloys / O. Benafan, G.S. Bigelow, A. Garg, R.D. Noebe, D.J. Gaydos, R.B. Rogers // *Shape Memory and Superelasticity*. – 2021. – Vol. 7. – P. 109–165. – DOI: 10.1007/s40830-020-00306-x.

22. Деформационная способность сплава с памятью формы TiNiHf при прокатке с импульсным током / В.В. Столяров, В.А. Андреев, Р.Д. Карелин, У.Х. Угурчиев, В.В. Черкасов, В.С. Комаров, В.С. Юсупов // *Обработка металлов (технология,*

оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 66–75. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-66-75.

23. Production mechanical and functional properties of long-length TiNiHf rods with high-temperature shape memory effect / R. Karelin, V. Komarov, V. Cherkasov, V. Yusupov, S. Prokoshkin, V. Andreev // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (2). – P. 615. – DOI: 10.3390/ma16020615.

24. Tailoring thermal and electrical conductivities of a Ni-Ti-Hf-based shape memory alloy by microstructure design / M. Keret-Klainer, R. Padan, Y. Khoptiar, Y. Kauffmann, Y. Amouyal // *Journal of Materials Science*. – 2022. – Vol. 57 (25). – P. 12107–12124. – DOI: 10.1007/s10853-022-07383-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Production of rods and sheets from TiNiHf alloy with high-temperature shape memory effect by longitudinal rolling and rotary forging methods

Roman Karelin^{a,*}, Viktor Komarov^b, Vladimir Cherkasov^c, Artem Osokin^d,
 Konstantin Sergienko^e, Vladimir Yusupov^f, Vladimir Andreev^g

A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, 49 Leninsky Ave., Moscow, 119334, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4795-8668>,  rdkarelin@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>,  vickomarov@gmail.com;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-5450-3565>,  cherkasov.vv@misis.ru; ^d  <https://orcid.org/0009-0008-4945-3648>,  art.osokin1201@icloud.com;
^e  <https://orcid.org/0000-0003-4018-4599>,  shulf@yandex.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0002-0640-2217>,  vsyusupov@mail.ru;
^g  <https://orcid.org/0000-0003-3937-1952>,  andreev.icmateks@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 July 2025

Revised: 28 July 2025

Accepted: 07 August 2025

Available online: 15 September 2025

Keywords:

Shape memory alloy

Rolling

Hardness

Rotary forging

Funding

The study was conducted with the financial support of the State Task of IMET RAS on 2025 year № 075-00319-25-00.

ABSTRACT

Introduction. *Ti-Ni* based shape memory alloys (*SMA*s) are functional materials that find widespread practical application in engineering and medicine. Functional properties of *Ti-Ni* based alloys are sensitive to the chemical composition. To develop alloys with specific properties, ternary *SMA*s are being actively developed. For example, *TiNiHf* ternary alloys are characterized by a high-temperature shape memory effect. Today, there is a demand for *SMA*s used in the production of functional elements with a response temperature of more than 120 °C. These alloys must also have sufficient ductility to obtain deformed semi-finished products for the subsequent manufacture of heat-sensitive functional elements. Also among the current issues of developing the practical application of *TiNiHf* alloys is the lack of technological schemes for obtaining semi-finished products from *TiNiHf SMA*s. **The purpose of this work** is study the feasibility of conducting deformation processing of the studied *TiNiHf* alloys with a high-temperature shape memory effect and to identify the relationships between phase composition and mechanical characteristics and the applied processing method. **In this work**, the possibility of producing sheets and rods from *TiNiHf* alloys with 5 and 10 at.% *Hf* and 50.0 at.% *Ni* by longitudinal rolling, caliber rolling, and rotary forging was investigated. **The research methods** were: X-ray analysis, differential scanning calorimetry, and measurement of *Vickers* hardness. **Results and discussion.** It was found that the *TiNiHf* alloy with 10 at.% *Hf* has insufficient ductility. From the alloy with 5 at.% *Hf*, blanks in the form of sheets and rods of various sizes were obtained by using longitudinal rolling and rotary forging processes. It was shown that hot deformation allows increasing the hardness of the studied *TiNiHf* alloy with 5 at.% *Hf* compared to the cast state, from 232 HV to 242–264 HV. Cold deformation leads to a significant increase in hardness values up to 362–394 HV. Characteristic temperatures of the forward and reverse martensitic transformation are quite stable. The obtained results indicate the potential of using longitudinal rolling and rotary forging to obtain semi-finished products of *TiNiHf* alloys with 5 at.% *Hf* and to improve the functional and mechanical properties of the alloy after smelting.

For citation: Karelin R.D., Komarov V.S., Cherkasov V.V., Osokin A.A., Sergienko K.V., Yusupov V.S., Andreev V.A. Production of rods and sheets from TiNiHf alloy with high-temperature shape memory effect by longitudinal rolling and rotary forging methods. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 37–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-37-49. (In Russian).

References

1. Sadashiva M., Sheikh M.Y., Khan N., Kurbet R., Gowda T.D. A review on application of shape memory alloys. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2021, vol. 9 (6), pp. 111–120. DOI: 10.35940/ijrte.F5438.039621.

* Corresponding author

Karelin Roman D., Ph.D. (Engineering),
 A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science
 of the Russian Academy of Sciences,
 49 Leninsky ave.,
 119334, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 916 590-42-76, **e-mail:** rdkarelin@gmail.com

2. Nair V.S., Nachimuthu R. The role of NiTi shape memory alloys in quality of life improvement through medical advancements: A comprehensive review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2022, vol. 236 (7), pp. 923–950. DOI: 10.1177/09544119221093460.
3. Kim M.S., Heo J.K., Rodrigue H., Lee H.T., Pané S., Han M.W., Ahn S.H. Shape memory alloy (SMA) actuators: The role of material, form, and scaling effects. *Advanced Materials*, 2023, vol. 35 (33), p. 2208517. DOI: 10.1002/adma.202208517.
4. Khmelevskaya I., Komarov V., Kawalla R., Prokoshkin S., Korpala G. Features of Ti-Ni alloy structure formation under multi-axial quasi-continuous deformation and post-deformation annealing. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4 (3), pp. 4830–4835. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.04.079.
5. Karelin R., Komarov V., Khmelevskaya I., Cherkasov V., Andreev V., Yusupov V., Prokoshkin S. Effect of temperature-deformation regimes of equal channel angular pressing in core-shell mode on the structure and properties of near-equiatomic titanium nickelide shape memory alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1005, p. 176071. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176071.
6. Komarov V., Karelin R., Khmelevskaya I., Yusupov V., Gunderov D. Effect of post-deformation annealing on structure and properties of nickel-enriched Ti-Ni shape memory alloy deformed in various initially deformation-induced structure states. *Crystals*, 2022, vol. 12 (4), p. 506. DOI: 10.3390/cryst12040506.
7. Karelin R., Komarov V., Khmelevskaya I., Andreev V., Yusupov V., Prokoshkin S. Structure and properties of TiNi shape memory alloy after low-temperature ECAP in shells. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 872, p. 144960. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144960.
8. Parida J., Mishra S.C. NiTi-based ternary alloys. *Nickel-Titanium Smart Hybrid Materials*. Elsevier, 2022, pp. 191–213. DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00020-1.
9. Parvizi S., Hashemi S.M., Moein S. NiTi shape memory alloys: properties. *Nickel-titanium smart hybrid materials*. Elsevier, 2022, pp. 399–426. DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00021-3.
10. Ahmad M. Effect of ternary element addition on properties of TiNi-based shape memory alloys for engineering and medical applications. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 2023, vol. 36, pp. 7–20. DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00021-3.
11. Sampath S., Nguyen T.A. NiTi-based ternary shape-memory alloys. *Nickel-titanium smart hybrid materials*. Elsevier, 2022, pp. 123–137. DOI: 10.1016/B978-0-323-91173-3.00006-7.
12. Tong Y., Shuitcev A., Zheng Y. Recent development of TiNi-based shape memory alloys with high cycle stability and high transformation temperature. *Advanced Engineering Materials*, 2020, vol. 22, p. 1900496. DOI: 10.1002/adem.201900496.
13. Karakoc O., Atli K.C., Evrigen A., Pons J., Santamarta R., Benafan O., Noebe R.D., Karaman I. Effects of training on the thermomechanical behavior of NiTiHf and NiTiZr high temperature shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 794, p. 139857. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139857.
14. Tagiltsev A.I., Panchenko E.Y., Timofeeva E.E., Chumlyakov Y.I., Fatkullin I.D., Marchenko E.S., Karaman I. The effect of stress-induced martensite aging in tension and compression on B2-B19' martensitic transformation in $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{32.2}\text{Hf}_{17.5}$ high-temperature shape memory alloy. *Smart Materials and Structures*, 2021, vol. 30 (2), p. 025039. DOI: 10.1088/1361-665X/abdaa8.
15. Shuitcev A., Gunderov D.V., Sun B., Li L., Valiev R.Z., Tong Y.X. Nanostructured $\text{Ti}_{29.7}\text{Ni}_{50.3}\text{Hf}_{20}$ high temperature shape memory alloy processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, vol. 52, pp. 218–225. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.01.065.
16. Akgul O., Tugrul H.O., Kockar B. Effect of the cooling rate on the thermal and thermomechanical behavior of NiTiHf high-temperature shape memory alloy. *Journal of Materials Research*, 2020, vol. 35, iss. 12, pp. 1572–1581. DOI: 10.1557/jmr.2020.139.
17. Shuitcev A., Vasin R.N., Balagurov A.M., Li L., Bobrikov I.A., Tong Y.X. Thermal expansion of martensite in $\text{Ti}_{29.7}\text{Ni}_{50.3}\text{Hf}_{20}$ shape memory alloy. *Intermetallics*, 2020, vol. 125, p. 106889. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106889.
18. Catal A.A., Bedir E., Yilmaz R., Canadinc D. Design of a NiTiHf shape memory alloy with an austenite finish temperature beyond 400 °C utilizing artificial intelligence. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 904, p. 164135. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164135.
19. Kim J.H., Park C.H., Kim S.W., Hong J.K., Oh C.X., Jeon Y.M., Kim K.K., Yeom J.T. Effects of microstructure and deformation conditions on the hot formability of Ni-Ti-Hf shape memory alloys. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, vol. 14, pp. 9548–9553. DOI: 10.1166/jnn.2014.10191.
20. Babacan N., Bilal M., Hayrettin C., Liu J., Benafan O., Karaman I. Effects of cold and warm rolling on the shape memory response of $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{30}\text{Hf}_{20}$ high-temperature shape memory alloy. *Acta Materialia*, 2018, vol. 157, pp. 228–244. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.07.009.

21. Benafan O., Bigelow G.S., Garg A., Noebe R.D., Gaydos D.J., Rogers R.B. Processing and scalability of NiTiHf high-temperature shape memory alloys. *Shape Memory and Superelasticity*, 2021, vol. 7, pp. 109–165. DOI: 10.1007/s40830-020-00306-x.

22. Stolyarov V.V., Andreev V.A., Karelin R.D., Ugurchiev U.Kh., Cherkasov V.V., Komarov V.S., Yusupov V.S. Deformability of TiNiHf shape memory alloy under rolling with pulsed current. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 66–75. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-66-75.

23. Karelin R., Komarov V., Cherkasov V., Yusupov V., Prokoshkin S., Andreev V. Production mechanical and functional properties of long-length TiNiHf rods with high-temperature shape memory effect. *Materials*, 2023, vol. 16 (2), p. 615. DOI: 10.3390/ma16020615.

24. Keret-Klainer M., Padan R., Khoptiar Y., Kauffmann Y., Amouyal Y. Tailoring thermal and electrical conductivities of a Ni-Ti-Hf-based shape memory alloy by microstructure design. *Journal of Materials Science*, 2022, vol. 57, iss. 25, pp. 12107–12124. DOI: 10.1007/s10853-022-07383-6.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).