



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Деформационная способность сплава с памятью формы TiNiHf при прокатке с импульсным током

Владимир Столяров^{1, а, *}, Владимир Андреев^{2, б}, Роман Карелин^{2, 3, в}, Умар Угурчиев^{1, д},
 Владимир Черкасов^{3, е}, Виктор Комаров^{2, 3, ф}, Владимир Юсупов^{2, г}

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок, д.4, г. Москва, 101990, Россия

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский пр. 49, г. Москва, 119334, Россия

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский пр. 4/1, г. Москва, 119049, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0001-7604-3961>, vlstol@mail.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3937-1952>, andreev.icmateks@gmail.com,

^в <https://orcid.org/0000-0002-4795-8668>, rdkarelin@gmail.com, ^д <https://orcid.org/0000-0003-2072-6354>, umar77@bk.ru,

^е <https://orcid.org/0000-0002-5450-3565>, v.basenchikov@yandex.ru, ^ф <https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>, vickomarov@gmail.com,

^г <https://orcid.org/0000-0002-0640-2217>, vsyusupov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.5

История статьи:

Поступила: 27 апреля 2022

Рецензирование: 06 мая 2022

Принята к печати: 18 июня 2022

Доступно онлайн: 15 сентября 2022

Ключевые слова:

Сплав с памятью формы

Прокатка

Импульсный ток

Структура

Деформируемость

Твердость

Финансирование:

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИМЕТ РАН № 075-00715-22-00.

АННОТАЦИЯ

Введение. Деформационная способность материалов является одной из основных механических характеристик, определяющих возможность их производства с применением различных технологических процессов обработки металлов давлением. Среди интерметаллических соединений особая роль принадлежит сплавам с высокотемпературным эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе TiNi легированных гафния. Большинство таких сплавов являются не только трудно деформируемыми, но и достаточно хрупкими. Поэтому разработка любых технологических схем для повышения деформационной способности данных сплавов является актуальной. **Цель работы:** исследование деформационной способности и возможности применения электрического импульсного тока при холодной прокатке сплава TiNiHf. Данный способ обработки ранее не применялся к этим сплавам. **В работе исследована** деформационная способность при холодной прокатке полосы толщиной 2 мм из труднодеформируемого высокотемпературного сплава с памятью формы на основе TiNi с добавкой гафния. Для повышения деформируемости использовали внешнее воздействие в виде импульсного тока высокой плотности более 200 А/мм². **Методами исследования являлись:** рентгенографический анализ с целью оценки исходного фазового состояния, анализ эволюции истинной и инженерной деформации до разрушения (появления видимых макротрещин в зоне деформирования), оптическая микроскопия с увеличением от 50 до 100 и измерение твердости по Виккерсу при комнатной температуре. **Результаты и обсуждение.** Установлено повышение деформируемости при воздействии импульсного тока по сравнению с прокаткой без тока и достижение максимальной деформации 1,7 (истинная) и 85 % (инженерная). Исходная крупнозернистая равноосная мартенситная микроструктура (50 мкм) трансформируется в вытянутую вдоль направления прокатки микроструктуру, при этом твердость повышается на 50 %. Отсутствие заметных структурных изменений и наблюдающееся упрочнение могут свидетельствовать о нетепловом эффекте тока в повышении деформируемости. Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности применения метода прокатки с током труднодеформируемого сплава TiNiHf с памятью формы в качестве способа обработки металлов давлением.

Для цитирования: 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.

Введение

Деформационная способность материалов является одной из механических характеристик, которая определяет способность твердых тел изменять форму и размеры под воздействием внешних факторов, включая обработку давлением. Эта характеристика важна для оценки

*Адрес для переписки

Столяров Владимир Владимирович, д.т.н., профессор
 Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
 Харитоньевский пер.4,
 101990, г. Москва, Россия
 Тел.: 8 (915) 294-69-41, e-mail: vlstol@mail.ru

эксплуатационного поведения материалов, но особенно необходима при создании технологических процессов, связанных с прокаткой, прессованием, волочением, осадкой. Для разных металлических материалов она может составлять от долей до десятков процентов, что ограничивает либо расширяет возможности технологических приемов воздействия на материал. Наиболее распространенным методом повышения деформационной способности является нагрев материалов перед обработкой, который в ряде случаев не желателен из-за изменения других свойств (например, коррозионной стойкости, водородного охрупчивания и т. д.) или снижения экономической эффективности. Деформационная обработка с применением импульсного электрического тока позволяет решить эти проблемы для ряда хрупких или труднодеформируемых металлов, сталей и сплавов на основе Ti, Zr, Al, Mg, Fe [1–15]. Среди исследованных материалов особая роль принадлежит сплавам на основе упорядоченного интерметаллического соединения TiNi, обладающего эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхупругостью при температурах, близких к комнатной [16, 17]. Исследования показали перспективность применения импульсного тока к двухкомпонентным сплавам на основе TiNi для получения длинномерных полуфабрикатов тонкого сечения на финишных стадиях обработки давлением [2, 3, 9]. Такие сплавы благодаря своим уникальным свойствам активно используются в различных отраслях экономики. Температура окончания обратного мартенситного превращения в никелиде титана эквиатомного состава представляет порядка 80...90 °С, что сдерживает его применение при более высоких температурах. В последнее время также рассматриваются высокотемпературные многокомпонентные сплавы с существенно более высокой температурой ЭПФ, в которых

часть атомов никеля или титана замещается атомами гафния [18–24]. В отличие от никелида титана сплавы, легированные гафнием, являются не только труднодеформируемыми, но достаточно хрупкими. Необходимостью практического использования данных сплавов в виде длинномерных изделий тонкого сечения вызваны повышенные требования к их деформационной способности при прокатке или волочении, особенно на финальных стадиях изготовления. До настоящего времени в литературе не было сведений о применении метода электростимулирования к сплавам на основе TiNi с добавкой гафния. Поэтому разработка любых технологий, включая электропластическую прокатку, для повышения деформационной способности данных сплавов является актуальной.

Цель статьи – исследование деформационной способности и возможности применения электрического импульсного тока при холодной прокатке сплава TiNiHf. Такая обработка показала свою эффективность применительно к никелиду титана [3], однако к хрупким сплавам, легированным гафнием, где особую роль играет охрупчивающая фаза, ранее не применялась.

Материал и метод исследования

Материалом исследования был выбран сплав TiNiHf, полученный методом электронно-лучевой плавки в «Промышленном центре МАТЭК-СПФ» из шихтовых материалов: никелида титана марки ТН-1 в виде прутка диаметром 12 мм и проволоки из гафния диаметром 1 мм. Химический состав слитка приведен в табл.1. Образцы для прокатки вырезались из слитка методом электроэрозионной резки в форме полос размерами 2,0×6,0×131 мм³.

Форма, размеры слитка и образца для прокатки показаны на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава
Chemical composition of the alloy

Масс.%			Ат.%		
Ti	Ni	Hf	Ti	Ni	Hf
38,2	47,0	14,8	47,4	47,6	5,0

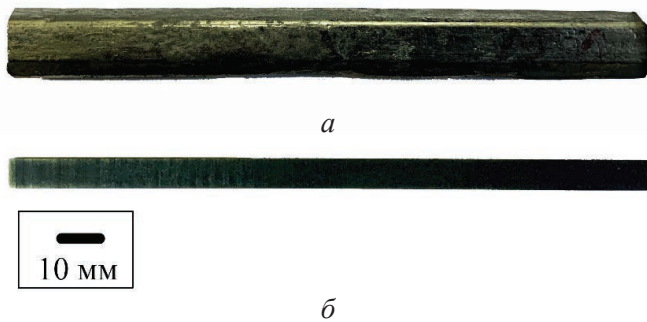


Рис. 1. Форма и размеры образцов из сплава TiNiHf:
а – слиток; б – полоса для прокатки

Fig. 1. Shape and dimensions of TiNiHf alloy samples:
а – ingot; б – strip for rolling

Для плоской прокатки использовали двух-валковый стан с диаметром валков 65 мм. Импульсный ток подавался от генератора с параметрами: сила тока $J = 500 \dots 5000$ А, длительность импульса от $\tau \leq 1000$ мкс и частота в интервале $\nu = 1 \dots 1000$ Гц. Схема подвода тока и направление деформации показаны на рис. 2.

Скорость прокатки и обжатие по толщине составляли 60 мм/с и 25 мкм соответственно. Процесс осуществлялся при комнатной температуре. Во избежание перегрева образцы после каждого этапа прокатки охлаждали в воде. Равномерность распределения деформации по длине и толщине обеспечивали вращением заготовки вокруг продольной оси на 180° и сменой на-

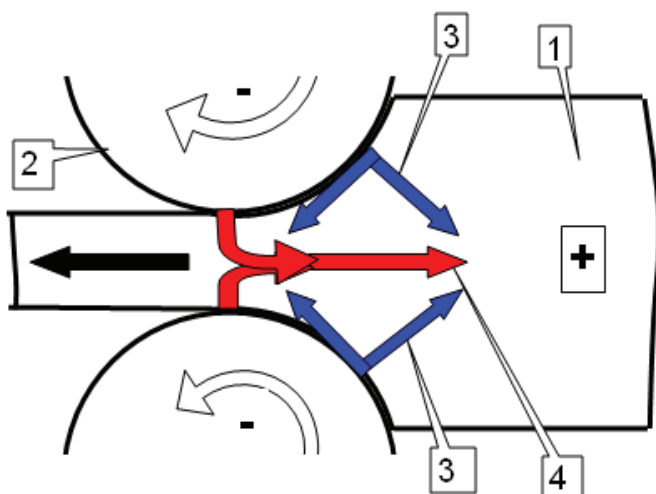


Рис. 2. Схема подвода тока и направление деформации:

1 – заготовка; 2 – цилиндрические валки; 3 – направление усилий; 4 – направление тока

Fig. 2. Scheme of current supply and strain direction:
1 – work materials; 2 – cylindrical rolls; 3 – force direction;
4 – current direction

правления прокатки на противоположное. Плотность тока j варьировалась от 200 А/мм^2 в начале процесса до 580 А/мм^2 на конечных проходах при длительности импульса 200 мкс и частоте 500 Гц. При меньших значениях j деформационное поведение сплава не отличалось от такового при прокатке без тока, а разрушение происходило уже после первых проходов. Истинная деформация вычислялась по формуле $e = \ln S_0 / S_k$ (где S_0, S_k – площадь поперечного сечения полосы до и после прокатки).

Исследование микроструктуры проводили на световом микроскопе Versamet-2 Union с увеличением от 50 до 100. Образцы для световой микроскопии шлифовали на абразивной бумаге с величиной зернистости от P120 до P2500 с последующей полировкой. После механической шлифовки и полировки образцы травили в растворах: $\text{1HF:3HNO}_3\text{:6H}_2\text{O}_2$. Степень деформационного упрочнения сплава определяли путём измерения твердости по Виккерсу. Испытания проводили при комнатной температуре на твердомере LECOM 400-A под нагрузкой 1 Н с выдержкой вдавленного индентора 10 с.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе впервые был опробован способ обработки труднодеформируемых хрупких сплавов системы TiNiHf с пониженным содержанием Ni методом холодной прокатки с импульсным током.

Фазовый состав и Микроструктура

Рентгеновская дифрактограмма сплава в исходном состоянии при комнатной температуре представлена на рис. 3. На рентгенограмме уверенно индицируются линии мартенсита и фазы $(\text{Ti, Hf})_2 \text{Ni}$. Отсутствие видимых линий высокотемпературной фазы – аустенита подтверждает, что температура начала обратного мартенситного превращения превышает 25°C . Слабое уширение рентгеновских линий свидетельствует о низкой степени дефектности кристаллической решетки, что характерно для рекристаллизованной структуры. Таким образом, исходя из результатов рентгенофазового анализа можно сделать вывод о том, что охрупчивающая фаза $(\text{Ti, Hf})_2 \text{Ni}$ содержится в значительном количестве в исходном образце.

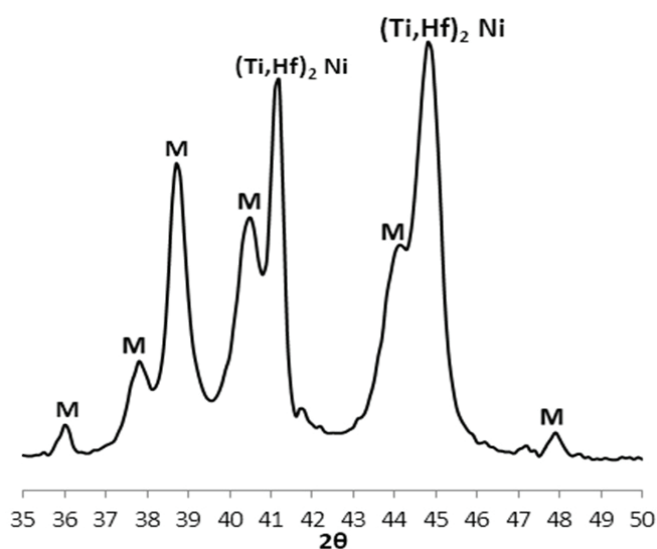


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма сплава в исходном состоянии

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of the alloy in the initial state

На рис. 4 представлены микроструктуры сплава TiNiHf в исходном состоянии и после прокатки с током до толщины полосы 0,6 мм. В исходном состоянии сплав TiNiHf имеет рекристаллизованную структуру со средним размером зерен в продольном и поперечном сечении порядка 50 мкм (рис. 3, а, б). Наблюдаются тонкие полосы мартенсита, расположенные внутри зерен, не исключено наличие остаточного аустенита. На границах зёрен наблюдается скопление частиц избыточной фазы типа $(\text{Ti, Hf})_2\text{Ni}$, образовавшихся непосредственно после выплавки [10]. Предполагается, что фазовый состав сплава при комнатной температуре представляет собой смесь мартенсита, небольшого количества остаточного аустенита и фазы $(\text{Ti, Hf})_2\text{Ni}$ объемной долей около 20...25 %, оцениваемой визуально. Пластинчатая форма внутризеренной фазы

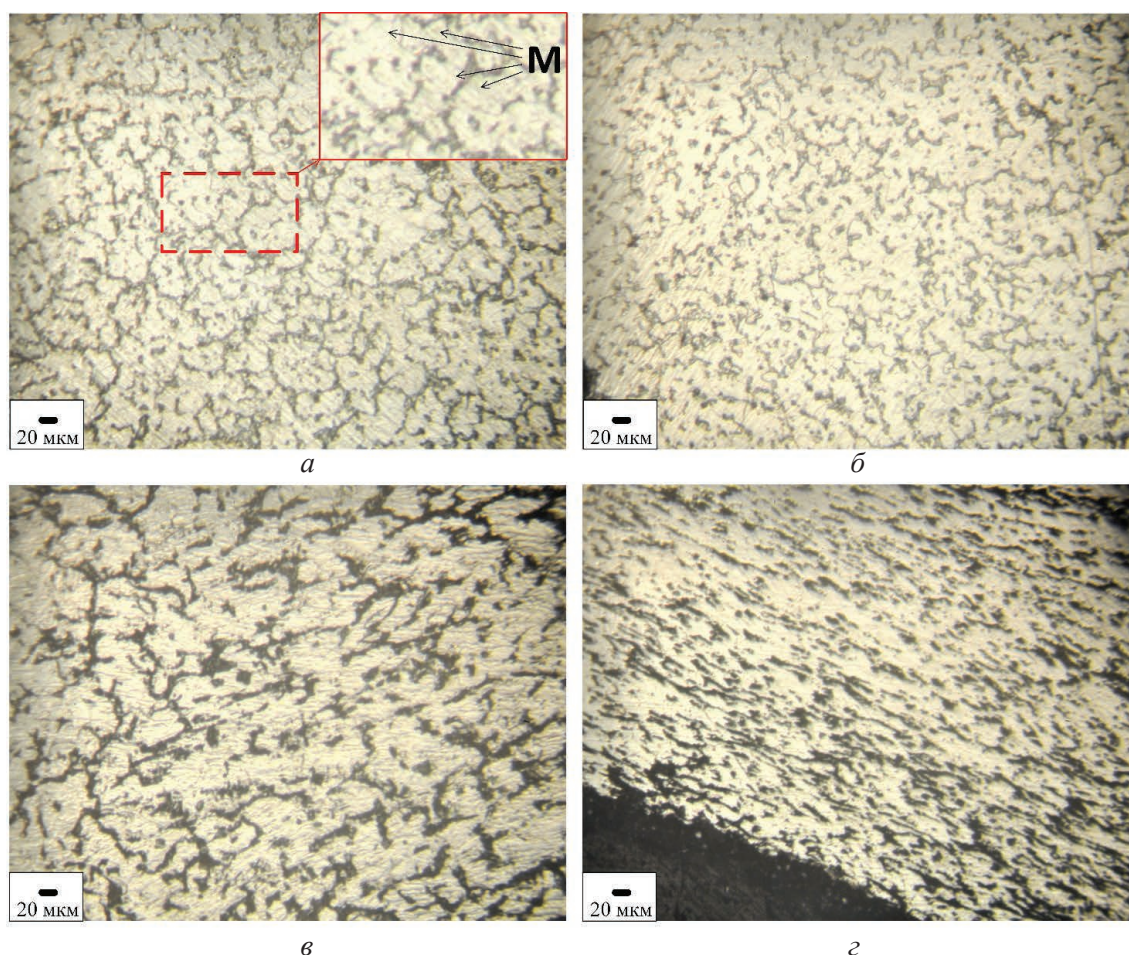


Рис. 4. Микроструктура сплава в исходном (а, б) и прокатанном с током (в, г) состояниях:

а, в – вдоль направления прокатки; б, г – поперек направления прокатки

Fig. 4. Microstructure of the alloy in the initial (а, б) and current-rolled (в, г) states:

а, в – along the rolling direction; б, г – across the rolling direction

и результаты собственных исследований РФА (рис. 3) подтверждают это предположение. Прокатка с током приводит к изменению морфологии зеренной структуры: она становится более вытянутой (рис. 4, в). Одновременно наблюдается еще более выраженное удлинение зерен в поперечном направлении (рис. 4, г), что может быть обусловлено как геометрией образца, так и особенностями пластического течения данного сплава при прокатке с током. Это, в свою очередь, приводит к перераспределению частиц фазы $(\text{Ti, Hf})_2\text{Ni}$, которые выстраиваются вдоль вытянутых границ структурных элементов, сформировавшихся в процессе прокатки с током. Следует отметить, что несмотря на большое количество макротрещин, на боковых кромках заготовок после прокатки межзеренные и внутризеренные микротрещины на всех этапах деформации в объеме исследуемого сплава обнаружены не были.

Деформируемость и твердость

Эксперименты, проведенные на плоских образцах, показали, что при прокатке без тока (рис. 5, а) или с током плотностью $j < 200 \text{ А/мм}^2$ (рис. 3, б) сплав TiNiHf разрушается хрупко уже после первых 3-4 проходах ($e \leq 0.07$) и без образования краевых дефектов (рис. 5, а, б). В большинстве случаев происходит разделение образца на несколько частей. Стоит отметить, что величина обжатия по толщине при этом не превышает 5 %.

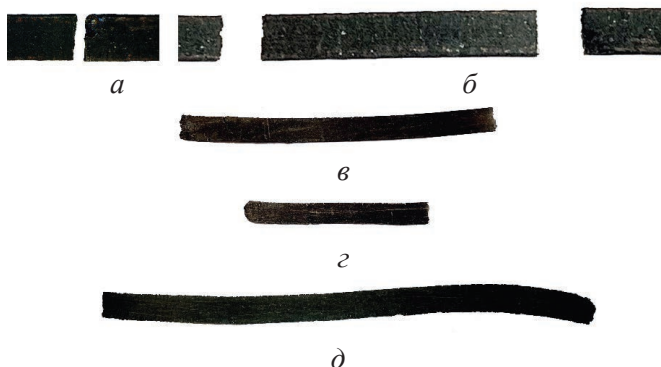


Рис. 5. Вид образцов при прокатке без тока (а) и с током (б–д) при истинной деформации:

а – $e = 0$; б – $e = 0.07$; в – $e = 0.39$; г – $e = 0.85$; д – $e = 1.47$

Fig. 5. Appearance of samples during rolling without current (a) and with current (б–д) at true deformation:

а – $e = 0$; б – $e = 0.07$; в – $e = 0.39$; г – $e = 0.85$; д – $e = 1.47$

Деформируемость повышается с увеличением плотности тока $j \geq 200 \text{ А/мм}^2$, которая позволяет сохранить цельность образца (рис. 5 в–д). Отметим, что всегда микроразрушение начинается с боковых поверхностей полосы, которое увеличивается, но не приводит к макроразрушению (рис. 6). Образующиеся в процессе прокатки краевые микротрещины обусловлены концентрацией преимущественно растягивающих напряжений при переходе от объемного состояния в исходной заготовке к плосконапряженному состоянию в тонкой полосе. Очевидно, что введение импульсного тока при прокатке сдерживает процесс образования и распространения трещин.



Рис. 6. Стереомикроскопическое изображение образца, прокатанного с током, $j = 580 \text{ А/мм}^2$, $e = 1.47$

Fig. 6. Stereomicroscopic image of the sample rolled with current, $j = 580 \text{ А/мм}^2$, $e = 1.47$

В табл. 2 показано изменение геометрических размеров поперечного сечения, а также твердости, инженерной и истинной деформации при прокатке полосы с импульсным током.

Результаты измерения и анализ твердости показали, что увеличение накопленной деформации в результате прокатки с током приводит к повышению твердости практически по линейной зависимости (табл. 2). Можно предположить, что данное упрочнение является следствием нескольких факторов: повышение объемной доли мартенсита за счет деформационного превращения остаточного аустенита; изменение температуры начала обратного мартенситного превращения M_H относительно температуры

Размеры сечения полосы, деформация и твердость при прокатке с током
Dimensions of the strip section, deformation and hardness during rolling with current

Номер прохода	Начальное сечение $T \times Ш$, мм	Конечное сечение, $T \times Ш$, мм	Инженерная степень деформации, %	Истинная деформация, ϵ	HV
Без прокатки	$2,0 \times 6,0$	$2,0 \times 6,0$	0	0	310
1...36	$2,0 \times 6,0$	$1,15 \times 7,1$	42,5	0,39	340
37...60	$1,15 \times 7,1$	$0,62 \times 8,3$	69,0	0,85	385
60...84	$0,62 \times 8,3$	$0,30 \times 9,2$	85,0	1,47	490

измерения (20 °C); повышение плотности дислокаций, субструктурного измельчения и увеличения количества интерметаллидных частиц на границах зерен. Характер деформационного упрочнения и отсутствие признаков рекристаллизации также свидетельствуют о минимальных тепловых воздействиях в процессе прокатки с током.

Выводы

1. Плоская прокатка полосы сплава TiNiHf толщиной 2 мм при комнатной температуре с импульсным током плотностью более 200 А/мм² позволяет достичь максимальной истинной деформации $\epsilon = 1,47$ без объемного разрушения.

2. Отсутствие заметных структурно-фазовых изменений и наблюдающееся упрочнение могут свидетельствовать о нетепловом эффекте тока в повышении деформируемости.

Список литературы

1. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства). В 2 т. Т. 1 / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. – М.: Ижевск: Ин-т компьютер. технологий, 2004. – 590 с.

2. Влияние режимов электропластической деформации на деформируемость и функциональные свойства сплава Ti-Ni с памятью формы / И.Б. Гуртовая, К.Э. Инаекян, А.В. Коротицкий, У.Х. Угурчиев, С.Ю. Макушев, И.Ю. Хмелевская, Е.С. Данилова, А.Е. Сергеева, В.В. Столяров, С.Д. Прокошкин // Журнал функциональных материалов. – 2008. – Т. 2, № 4. – С. 130–137.

3. Исследование возможности применения электропластической прокатки для получения прутков из сплава TiNi / А.А. Потапова, В.В. Столяров,

А.Б. Бондарев, В.А. Андреев // Машиностроение и инженерное образование. – 2012. – № 2. – С. 33–38.

4. Меденцов В.Э., Столяров В.В. Особенности деформирования, структура и механические свойства сплава ВТ6 при электропластической прокатке // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 12. – С. 37–41.

5. Effect of pulsed current on structure of Al–Mg–Si aluminum-based alloy during cold deformation / I.G. Brodova, I.G. Shirinkina, V.V. Astaf'ev, T.I. Yablonskikh, A.A. Potapova, V.V. Stolyarov // Physics of Metals and Metallography. – 2013. – Vol. 114 (11). – P. 940–946. – DOI: 10.1134/S0031918X13110021.

6. Комбинирование методов интенсивной пластической деформации конструкционных сталей / А.М. Иванов, У.Х. Угурчиев, В.В. Столяров, Н.Д. Петрова, А.А. Платонов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 54–57.

7. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip / Z. Xu, G. Tang, S. Tian, F. Ding, H. Tian // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 182 (1–3). – P. 128–133. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.07.019.

8. Effects of electroplastic rolling on mechanical properties and microstructure of low-carbon martensitic steel / L. Qian, L. Zhan, B. Zhou, X. Zhang, S. Liu, Z. Lv // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 812. – P. 141144. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.141144.

9. Effect of electroplastic rolling on the ductility and superelasticity of TiNi shape memory alloy / R.F. Zhu, G.Y. Tang, S.Q. Shi, M.W. Fu // Materials and Design. – 2013. – Vol. 44. – P. 606–611. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.045.

10. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // Journal of Materials Research. – 2010. – Vol. 25 (7). – P. 1215–1224. – DOI: 10.1557/JMR.2010.0170.

11. Effect of electroplastic rolling on deformability and oxidation of NiTiNb shape memory alloy / R. Zhu, G. Tang, S. Shi, M. Fu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213 (1). – P. 30–35. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.08.001.
12. Mal'tsev I.M. Electroplastic rolling of metals with a high-density current // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2008. – Vol. 49. – P. 175–180. – DOI: 10.3103/S1067821208030097.
13. Improvement of formability of Mg–3Al–1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling / X. Li, F. Wang, X. Li, G. Tang, J. Zhu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 618. – P. 500–504. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.09.060.
14. Effect of strain rate on microstructure and mechanical properties of electroplastic rolled ZrTi alloy / D.F. Guo, W.K. Deng, P. Song, X.L. Lv, Y. Shi, Z.H. Qu, G.S. Zhang // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – P. 202101366. – DOI: 10.1002/adem.202101366.
15. Microstructure dependent electroplastic effect in AA 6063 alloy and its nanocomposites / J. Tiwari, P. Pratheesh, O.B. Bembalge, H. Krishnaswamy, M. Amirthalangam, S.K. Panigrahi // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 12. – P. 2185–2204. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.112.
16. Deformation behavior, structure, and properties of an aging Ti–Ni shape memory alloy after compression deformation in a wide temperature range / V. Komarov, I. Khmelevskaya, R. Karelin, R. Kawalla, G. Korpala, U. Prahl, S. Prokoshkin // *JOM*. – 2021. – Vol. 73 (2). – P. 620–629. – DOI: 10.1007/s11837-020-04508-7.
17. Effect of quasi-continuous equal-channel angular pressing on structure and properties of Ti–Ni shape memory alloys / R.D. Karelin, I.Y. Khmelevskaya, V.S. Komarov, V.A. Andreev, M.M. Perkass, V.S. Yusupov, S.D. Prokoshkin // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – Vol. 30 (4). – P. 3096–3106. – DOI: 10.1007/s11665-021-05625-3.
18. Effects of cold and warm rolling on the shape memory response of Ni50Ti30Hf20 high-temperature shape memory alloy / N. Babacan, M. Bilal, C. Hayrettin, J. Liu, O. Benafan, I. Karaman // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 157. – P. 228–244. – DOI: 10.1016/j.actamat.2018.07.009.
19. 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 (4). – DOI: 10.1002/adem.201900496.
20. Microstructural and thermomechanical comparison of Ni-rich and Ni-lean NiTi–20 at.% Hf high temperature shape memory alloy wires / A.W. Young, R.W. Wheeler, N.A. Ley, O. Benafan, v Young // *Shape Memory and Superelasticity*. – 2019. – Vol. 5 (4). – P. 397–406. – DOI: 10.1007/s40830-019-00255-0.
21. Belbasi M., Salehi M.T. Influence of chemical composition and melting process on hot rolling of NiTiHf shape memory alloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2014. – Vol. 23 (7). – P. 2368–2372. – DOI: 10.1007/s11665-014-1006-8.
22. Effect of aging on the microstructure and shape memory effect of a hot-rolled NiTiHf alloy / M.M. Javadi, M. Belbasi, M.T. Salehi, M.R. Afshar // *Journal of materials engineering and performance*. – 2011. – Vol. 20 (4). – P. 618–622. – DOI: 10.1007/s11665-011-9885-4.
23. Effects of nanoprecipitation on the shape memory and material properties of an Ni-rich NiTiHf high temperature shape memory alloy / H.E. Karaca, S.M. Saghaian, G. Ded, H. Tobe, B. Basaran, H.J. Maier, R.D. Noebe, Y.I. Chumlyakov // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61 (19). – P. 7422–7431. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.08.048.
24. Coherency strains of H-phase precipitates and their influence on functional properties of nickel-titanium-hafnium shape memory alloys / B. Amin-Ahmadi, J.G. Pauza, A. Shamimi, T.W. Duerig, R.D. Noebe, A.P. Stebner // *Scripta Materialia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 83–87. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.01.005.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 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



Deformability of TiNiHf shape memory alloy under rolling with pulsed current

Vladimir Stolyarov^{1, a, *}, Vladimir Andreev^{2, b}, Roman Karelin^{2, 3, c}, Umar Ugurchiev^{1, d},
 Vladimir Cherkasov^{3, e}, Victor Komarov^{2, 3, f}, Vladimir Yusupov^{2, g}

¹ Mechanical Engineering Research Institute of RAS, 4 M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, 49 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119334, Russian Federation

³ National University of Science and Technology MISIS, 4/1 Leninskiy Prospekt, 119049, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7604-3961>, vlstol@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3937-1952>, andreev.icmateks@gmail.com,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4795-8668>, rdkarelin@gmail.com, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2072-6354>, umar77@bk.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-5450-3565>, v.basenchikov@yandex.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>, vickomarov@gmail.com,

^g <https://orcid.org/0000-0002-0640-2217>, vsyusupov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 April 2022

Revised: 06 May 2022

Accepted: 18 June 2022

Available online: 15 September 2022

Keywords:

Shape memory alloys

Rolling

Pulse current

Structure

Deformability

Hardness

Funding

The study was carried out within the framework of the state task of IMET RAS No. 075-00715-22-00.

ABSTRACT

Introduction. The deformation capacity of materials is one of the main mechanical characteristics that determine the possibility of its production using various technological processes for metal forming. Among intermetallic compounds, a special role belongs to alloys with a high-temperature shape memory effect (SME) based on *TiNi* with the addition hafnium. Most of these alloys are not only difficult to deform, but also quite brittle. Therefore, the development of any technological schemes to increase the deformation capacity of these alloys is relevant. **The purpose of the work:** to study the deformation capacity and the possibility of using electric pulsed current during cold rolling of the *TiNiHf* alloy. This processing method has not previously been applied to these alloys. **In this work,** the deformation capacity during cold rolling of a strip 2 mm thick made of a hard-to-deform high-temperature *TiNi*-based shape memory alloy with the addition of hafnium is studied. To increase the deformability, an external action in the form of a high-density pulsed current of more than 200 A/mm² is investigated. **The research methods are:** X-ray analysis to assess the initial phase state; analysis of the evolution of true and engineering deformation to failure (appearance of visible macrocracks in the deformation zone); optical microscopy with magnification from 50 to 100 and measurement of *Vickers* hardness at room temperature. **Results and discussion.** An increase in the deformability under the influence of a pulsed current compared to rolling without current and the achievement of a maximum strain of 1.7 (true) and 85% (engineering) are established. The initial coarse-grained equiaxed martensitic microstructure (50 μm) is transformed into a microstructure elongated along the rolling direction, while the hardness increases by 50%. The absence of noticeable structural changes and the observed hardening may indicate a nonthermal effect of the current in increasing the deformability. Thus, the results of the conducted studies indicate the prospects of the method of rolling with a current of a hard-to-deform *TiNiHf* shape memory alloy as a method of metal forming.

For citation: 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. (In Russian).

References

1. Troitskii O.A., Baranov Yu.V., Avramov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva)*. V 2 t. T. 1 [Physical foundations and technologies for processing modern materials (theory, technology, structure and properties). In 2 vols. Vol. 1]. Izhevsk, Institute of Computer Technologies Publ., 2004. 590 p.
2. Gurtovaya I.B., Inaekyan K. E., Korotitskii A.V., Ugurchiev U.Kh., Makushev S.Yu., Khmelevskaya I.Yu., Danilova E.S., Sergeeva A.E., Stolyarov V.V., Prokoshkin S.D. Vliyanie rezhimov elektroplasticheskoi deformatsii na

* Corresponding author

Stolyarov Vladimir V., D.Sc. (Engineering), Professor
 Mechanical Engineering Research Institute of RAS,
 4 M. Kharitonyevskiy Pereulok,
 101990, Moscow, Russian Federation
 Tel.: 8 (915) 294-69-41, e-mail: vlstol@mail.ru

deformiruemost' i funktsional'nye svoistva splava Ti-Ni s pamyat'yu formy [Influence of electroplastic deformation modes on deformability and functional properties of Ti-Ni shape memory alloy]. *Zhurnal funktsional'nykh materialov = Journal of functional materials*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 130–137.

3. Potapova A.A., Stolyarov V.V., Bondarev A.B., Andreev V.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya elektroplasticheskoi prokatki dlya polucheniya prutkov iz splava TiNi [Investigation of the possibility of using electroplastic rolling to obtain bars from the TiNi alloy]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical Engineering and Engineering Education*, 2012, no. 2, pp. 33–38.

4. Medentsov V.E., Stolyarov V.V. Osobennosti deformirovaniya, struktura i mekhanicheskie svoistva splava VT6 pri elektroplasticheskoi prokatke [Peculiarities of deformation, structure and mechanical properties of VT6 alloy during electroplastic rolling]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Deformation and Fracture of Materials*, 2012, no. 12, pp. 37–41.

5. Brodova I.G., Shirinkina I.G., Astaf'ev V.V., Yablonskikh T.I., Potapova A.A., Stolyarov V.V. Effect of pulsed current on structure of Al–Mg–Si aluminum-based alloy during cold deformation. *Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114 (11), pp. 940–946. DOI: 10.1134/S0031918X13110021.

6. Ivanov A.M., Ugurchiev U.Kh., Stolyarov V.V., Petrova N.D., Platonov A.A. Kombinirovaniye metodov intensivnoi plasticheskoi deformatsii konstruktivnykh stalei [Combination of severe plastic deformation methods of structure steels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2012, no. 6, pp. 54–57.

7. Xu Z., Tang G., Tian S., Ding F., Tian H. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 182 (1–3), pp. 128–133. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.07.019.

8. Qian L., Zhan L., Zhou B., Zhang X., Liu S., Lv Z. Effects of electroplastic rolling on mechanical properties and microstructure of low-carbon martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 812, p. 141144. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141144.

9. Zhu R.F., Tang G.Y., Shi S.Q., Fu M.W. Effect of electroplastic rolling on the ductility and superelasticity of TiNi shape memory alloy. *Materials and Design*, 2013, vol. 44, pp. 606–611. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.045.

10. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *Journal of Materials Research*, 2010, vol. 25 (7), pp. 1215–1224. DOI: 10.1557/JMR.2010.0170.

11. Zhu R., Tang G., Shi S., Fu M. Effect of electroplastic rolling on deformability and oxidation of NiTiNb shape memory alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213 (1), pp. 30–35. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.08.001.

12. Mal'tsev I.M. Electroplastic rolling of metals with a high-density current. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2008, vol. 49, pp. 175–180. DOI: 10.3103/S1067821208030097.

13. Li X., Wang F., Li X., Tang G., Zhu J. Improvement of formability of Mg–3Al–1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 618, pp. 500–504. DOI: 10.1016/j.msea.2014.09.060.

14. Guo D.F., Deng W.K., Song P., Lv X.L., Shi Y., Qu Z.H., Zhang G.S. Effect of strain rate on microstructure and mechanical properties of electroplastic rolled ZrTi alloy. *Advanced Engineering Materials*, 2022, p. 202101366. DOI: 10.1002/adem.202101366.

15. Tiwari J., Pratheesh P., Bembalge O.B., Krishnaswamy H., Amirthalingam M., Panigrahi S.K. Microstructure dependent electroplastic effect in AA 6063 alloy and its nanocomposites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 12, pp. 2185–2204. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.112.

16. Komarov V.S., Khmelevskaya I., Karelin R., Kawalla R., Korpala G., Prahl U., Prokoshkin S. Deformation behavior, structure, and properties of an aging Ti-Ni shape memory alloy after compression deformation in a wide temperature range. *JOM*, 2021, vol. 73 (2), pp. 620–629. DOI: 10.1007/s11837-020-04508-7.

17. Karelin R.D., Khmelevskaya I.Y., Komarov V.S., Andreev V.A., Perkas M.M., Yusupov V.S., Prokoshkin S.D. Effect of quasi-continuous equal-channel angular pressing on structure and properties of Ti-Ni shape memory alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30 (4), pp. 3096–3106. DOI: 10.1007/s11665-021-05625-3.

18. Babacan N., Bilal M., Hayrettin C., Liu J., Benafan O., Karaman I. Effects of cold and warm rolling on the shape memory response of Ni50Ti30Hf20 high-temperature shape memory alloy. *Acta Materialia*, 2018, vol. 157, pp. 228–244. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.07.009.

19. 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 (4). DOI: 10.1002/adem.201900496.

20. Young A.W., Wheeler R.W., Ley N.A., Benafan O., Young M.L. Microstructural and thermomechanical comparison of Ni-rich and Ni-lean NiTi-20 at.% Hf high temperature shape memory alloy wires. *Shape Memory and Superelasticity*, 2019, vol. 5 (4), pp. 397–406. DOI: 10.1007/s40830-019-00255-0.

21. Belbasi M., Salehi M.T. Influence of chemical composition and melting process on hot rolling of NiTiHf shape memory alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23 (7), pp. 2368–2372. DOI: 10.1007/s11665-014-1006-8.

22. Javadi M.M., Belbasi M., Salehi M.T., Afshar M.R. Effect of aging on the microstructure and shape memory effect of a hot-rolled NiTiHf alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20 (4), pp. 618–622. DOI: 10.1007/s11665-011-9885-4.

23. Karaca H.E., Saghaian S.M., Ded G., Tobe H., Basaran B., Maier H.J., Noebe R.D., Chumlyakov Y.I. Effects of nanoprecipitation on the shape memory and material properties of an Ni-rich NiTiHf high temperature shape memory alloy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61 (19), pp. 7422–7431. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.08.048.

24. Amin-Ahmadi B., Pauza J.G., Shamimi A., Duerig T.W., Noebe R.D., Stebner A.P. Coherency strains of H-phase precipitates and their influence on functional properties of nickel-titanium-hafnium shape memory alloys. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 147, pp. 83–87. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.01.005.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/>).