

07,11

## Высокоскоростной композитный микроактюатор на основе сплава $Ti_2NiCu$ с эффектом памяти формы

© Д.С. Кучин<sup>1</sup>, П.В. Лега<sup>1,¶</sup>, А.П. Орлов<sup>1,5</sup>, А.В. Фролов<sup>1</sup>, А.В. Иржак<sup>2,3</sup>, А.М. Жихарев<sup>1</sup>,  
А.П. Каманцев<sup>1</sup>, В.В. Коледов<sup>1</sup>, А.В. Шеляков<sup>4</sup>, В.Г. Шавров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Черноголовка, Россия

<sup>4</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

<sup>5</sup> Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

¶ E-mail: lega\_peter@list.ru, shavrov@cplire.ru

На основе биморфного композита из сплава  $Ti_2NiCu$  с термоупругим мартенситным переходом и эффектом памяти формы изготовлены образцы микроактюаторов и исследовано их быстродействие. Активный слой композитного актюатора представляет собой предварительно псевдопластически растянутый слой быстрозакаленного сплава  $Ti_2NiCu$ , а в качестве упругого слоя используется аморфный слой того же сплава. Типичные размеры микроактюатора —  $30 \times 2 \times 2 \mu m$ . Управляемая амплитуда перемещения кончика микроактюатора составляет около  $1 \mu m$ . Исследование быстродействия микроактюатора проводилось с помощью сканирующей электронной микроскопии. Активация микроактюатора достигалась нагревом при пропускании через него импульсов электрического тока. Продемонстрировано полное срабатывание микроактюатора на частотах до 1 kHz, частичное срабатывание наблюдалось на частотах вплоть до 8 kHz. Показана возможность работы устройства в автоколебательном режиме на частотах порядка 100 kHz.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 17-19-01748. Моделирование было выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-37-00466.

DOI: 10.21883/FTT.2018.06.45991.02M

### 1. Введение

Эффект памяти формы (ЭПФ) заключается в возвращении к первоначальной пространственной конфигурации при нагреве, которое наблюдается в некоторых материалах после предварительной деформации, в частности, в интерметаллических сплавах после деформации при фазовом термоупругом мартенситном переходе из высокосимметричной высокотемпературной (аустенитной) фазы в низкосимметричную низкотемпературную (мартенситную) фазу, происходящем при охлаждении. Сплавы с ЭПФ обладают набором превосходных свойств, среди которых высокая прочность материала (рабочие механические напряжения могут достигать сотен МПа) [1], способность возвращать большие деформации (до 10%) и развивать значительные усилия при нагреве [2] или при воздействии магнитного поля [3–6], сверхупругость (до 14%), высокая демпфирующая способность [7], хорошая коррозионная стойкость [8] и биосовместимость [9]. В настоящее время известно большое количество интерметаллических сплавов с ЭПФ, например NiTi,  $Ti_2NiCu$ , CuAlNi, CuZnAl,  $Ni_2MnGa$  и др. Они нашли широкое применение в различных областях техники, в частности в медицине, приборостроении, космической технике и т. д. [10,11]. В том случае, когда ЭПФ

реализуется при тепловом воздействии на материал, для работы устройств с ЭПФ в циклическом режиме необходимо организовать периодический подвод и отвод тепла. Управление устройством за счет нагрева и охлаждения может показаться нетехнологичным решением, так как тепловые процессы, особенно при охлаждении, довольно инертны. Однако при уменьшении размеров устройства характерные времена тепловых процессов снижаются квадратично. Это открывает перспективу создания быстродействующих миниатюрных устройств на основе сплавов с ЭПФ. Цель настоящей работы — создание и экспериментальное исследование быстродействия миниатюрных актюаторов на основе сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ при активации импульсами электрического тока.

### 2. Образцы и методы

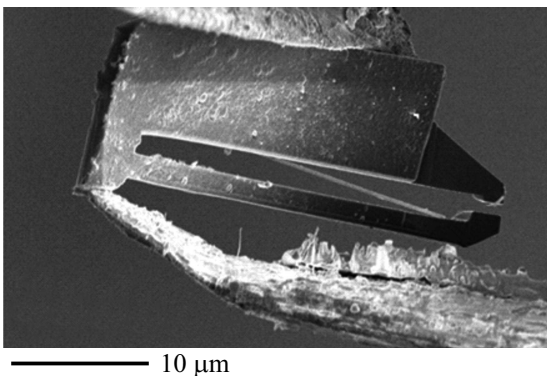
Для осуществления многократных обратимых изгибных деформаций в тонких образцах сплавов с ЭПФ в настоящей работе использована схема биметаллического композита. Для изготовления актюатора применялись быстрозакаленные ленты из сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ, полученные методом сверхбыстрой закалки из расплава на вращающемся медном диске [12]. В кристаллическом

состоянии сплав демонстрирует термоупругое мартенситное превращение первого рода из аустенитной фазы с кубической решеткой B2 в мартенситную фазу B19 с орторомбической решеткой [13]. Температуры начала и конца прямого и обратного мартенситного перехода составляют:  $M_s = 60^\circ\text{C}$ ,  $M_f = 52^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 55^\circ\text{C}$ ,  $A_f = 64^\circ\text{C}$  соответственно.

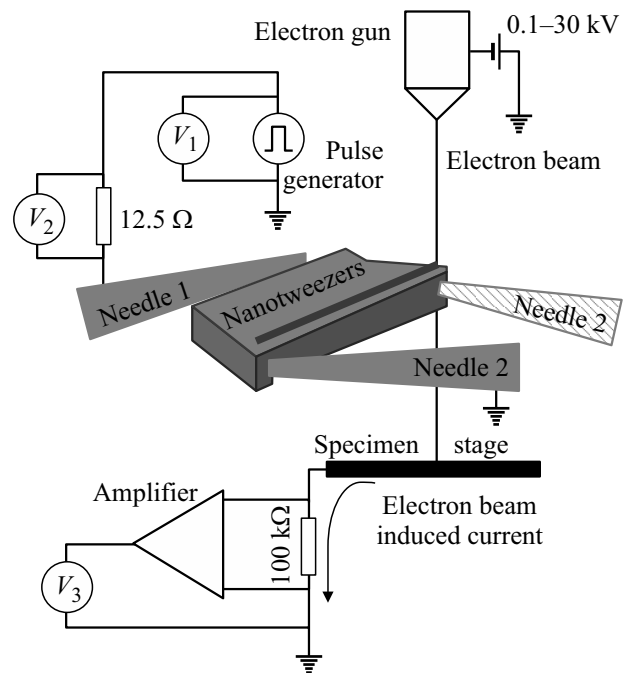
Для изготовления микроактюаторов ленты предварительно подвергались псевдопластической деформации растяжения, то есть нагревались до температуры выше  $A_f$ , а затем охлаждались до температуры ниже  $M_f$  под растягивающей нагрузкой 3–10 N. Затем края ленты утонялись методом электрохимического травления до толщины порядка 2–3  $\mu\text{m}$ . На втором этапе производилось формирование тела актюатора на краю ленты на установке фокусированного ионного пучка (ФИП). Следующим этапом проводилось нанесение упругого слоя путем травления методом ФИП вспомогательного отверстия в ленте. В результате распыленный сплав осаждался на тело актюатора и при этом аморфизовался, формируя, таким образом, упругий слой на поверхности предварительно растянутого слоя  $Ti_2NiCu$ . Все этапы изготовления микроактюатора проводились при температуре ниже температуры  $M_f$  перехода аустенит–мартенсит. Более подробно методика формирования композитного актюатора с упругим аморфным слоем изложена в [14,15].

При нагревании выше температуры  $A_f$  фазового перехода мартенсит–аустенит происходит сокращение активного слоя актюатора из-за наличия в нем псевдопластической деформации растяжения, при этом длина упругого слоя не изменяется, что приводит к изгибу актюатора, т.е. к его срабатыванию. При охлаждении ниже температуры  $M_f$  фазового перехода аустенит–мартенсит происходит распрямление актюатора за счет упругого слоя [16].

Нагрев актюатора проводился путем пропускания электрического тока через тело актюатора. Для реализации данной схемы в вакуумной камере сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) образец закреплялся на вольфрамовой игле микроманипулятора Kleindiek.



**Рис. 1.** Композитный актюатор в разомкнутом состоянии. Иглы манипуляторов используются как проводники электрического тока.



**Рис. 2.** Принципиальная схема экспериментальной установки.

Другая вольфрамовая игла, закрепленная на втором манипуляторе, подводилась к образцу для формирования замкнутой электрической цепи (рис. 1). Для предотвращения перегрева актюатора и оценки времени срабатывания был проведен расчет плотности тока и выделяемой теплоты. Полное электрическое сопротивление цепи из образца, игл манипуляторов и подводящих проводов находилось в диапазоне 20–100  $\Omega$  и определялось в основном качеством контакта между телом актюатора и иглой второго микроманипулятора. Ток срабатывания актюатора находился в пределах 4–11 mA. Для исследования скорости срабатывания актюатора использовалось устройство СЭМ CrossbeamNeon 40 EsB. Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 2.

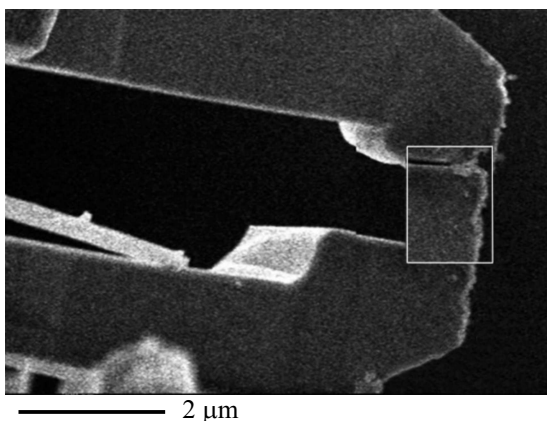
### 3. Результаты экспериментов

Исследование быстродействия микроактюатора на низких частотах проводилось визуально на экране СЭМ. Для уменьшения времени развертки кадра область сканирования ограничивалась участком площадью около  $1 \mu\text{m}^2$ , непосредственно вблизи его кончика (рис. 3). Таким образом, можно было надежно детектировать срабатывание устройства (цикл смыкание–размыкание) при длительности управляющего электрического импульса не короче 5 ms. Дальнейшее уменьшение длительности импульса тока приводило к тому, что время развертки кадра СЭМ даже в такой маленькой области значительно превышало характерное время срабатывания микроактюатора. Следует отметить, что при визуальном наблю-

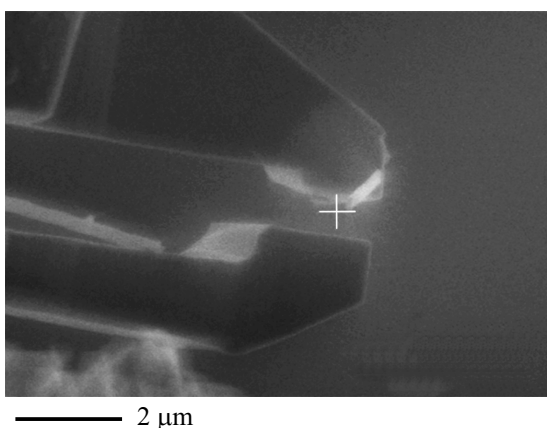
дении срабатывание актюатора происходит практически моментально при подаче импульса электрического тока.

Для проведения дальнейших исследований при более высоких частотах (более коротких электрических импульсах) методика проведения измерений была изменена. Узкий электронный пучок диаметром в несколько нанометров был сфокусирован на объектном столике СЭМ в точке, находящейся в непосредственной близости от кончика актюатора, таким образом, чтобы при срабатывании актюатора происходило перекрытие электронного пучка (рис. 4). Сила тока электронного пучка в ходе измерений составляла 1 nA. Объектный столик СЭМ заземлен через резистор нагрузки 100 kΩ, к которому подключался цифровой осциллограф. При перекрытии электронного пучка актюатором напряжение на нагрузочном резисторе объектного столика становилось равным нулю, что позволяло зафиксировать факт срабатывания микромеханического устройства.

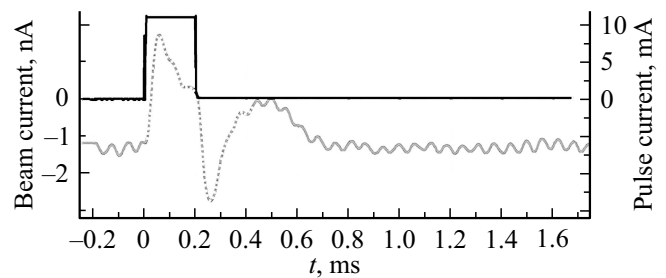
В результате измерений был получен ряд зависимостей, как для одиночных импульсов, так и для периодических последовательностей импульсов. Длительность импульсов варьировалась от 200 ms до 50 μs,



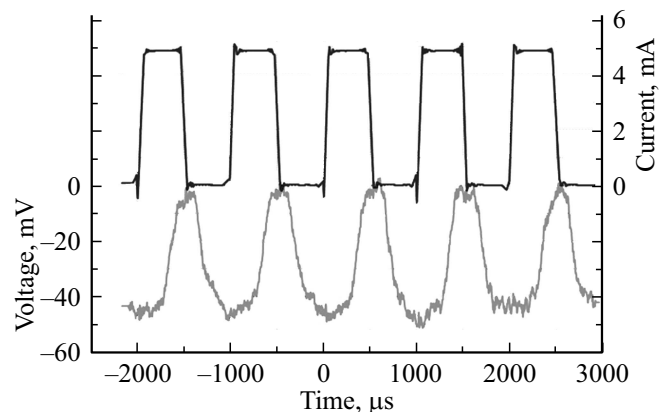
**Рис. 3.** Композитный актюатор. Область сканирования СЭМ для визуального контроля срабатывания актюатора отмечена белой рамкой.



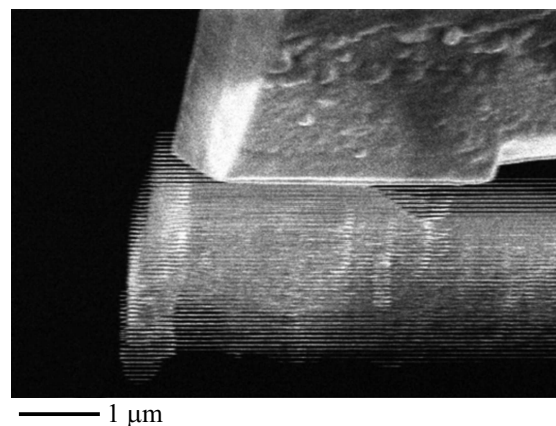
**Рис. 4.** Композитный актюатор. Белым крестом отмечено место фокусировки электронного пучка СЭМ.



**Рис. 5.** Временная зависимость срабатывания актюатора и управляющего напряжения при длине импульсов 200 μs. Верхняя линия — управляющее напряжение, нижняя линия — сигнал от электронного пучка СЭМ.

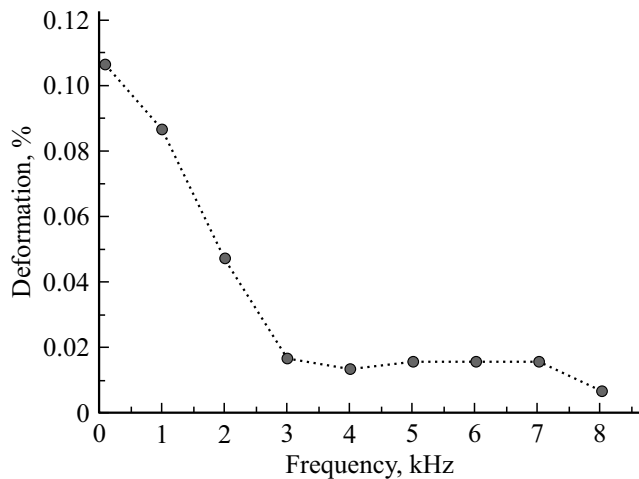


**Рис. 6.** Временная зависимость срабатывания актюатора и управляющего напряжения после вычета шума при длине импульсов 500 μs. Верхняя линия — управляющее напряжение, нижняя линия — сигнал от электронного пучка СЭМ.

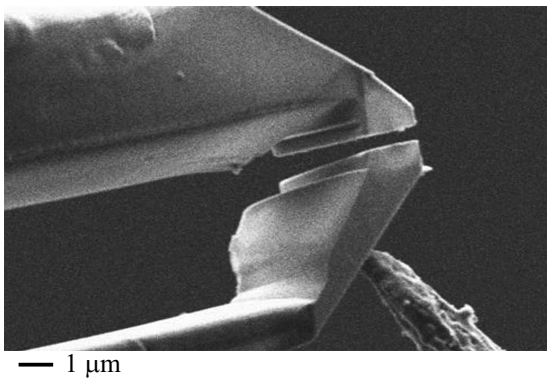


**Рис. 7.** Вибрация актюатора при высоких частотах управляющего напряжения. Время развертки кадра СЭМ значительно меньше периода колебаний.

что соответствует частотам в диапазоне от 5 Hz до 20 kHz. На рис. 5 показана осциллограмма временной зависимости импульсов тока (верхняя линия) и напряжения на нагрузочном резисторе (нижняя линия) для импульсов длительностью 200 μs. Пунктирной линией на нижней линии осциллограммы отображена часть



**Рис. 8.** Зависимость относительной деформации от частоты управляющего напряжения при частотах 1–8 kHz.



**Рис. 9.** Положение иглы микроманипулятора для наблюдения автоколебаний.

сигнала, соответствующая шумам, возникающим при замыкании и размыкании электрической цепи. Данный шум был измерен и впоследствии вычитался из сигнала при обработке. Пример обработанной осциллограммы приведен на рис. 6, он соответствует длине импульса в  $500 \mu s$  и частоте повторения импульсов 1 kHz, при этом хорошо заметно время запаздывания между импульсом активации и срабатыванием актюатора.

По данным авторов, в мировой литературе наилучшим по быстродействию является актюатор с ЭПФ, представленный в работе [17]. В этой работе продемонстрирована работа композитного актюатора на основе микропроволок из  $Ti-Ni$  с частотой управляемых деформаций 35 Hz. В связи с этим, актюатор, представленный в настоящей работе, является рекордным по быстродействию.

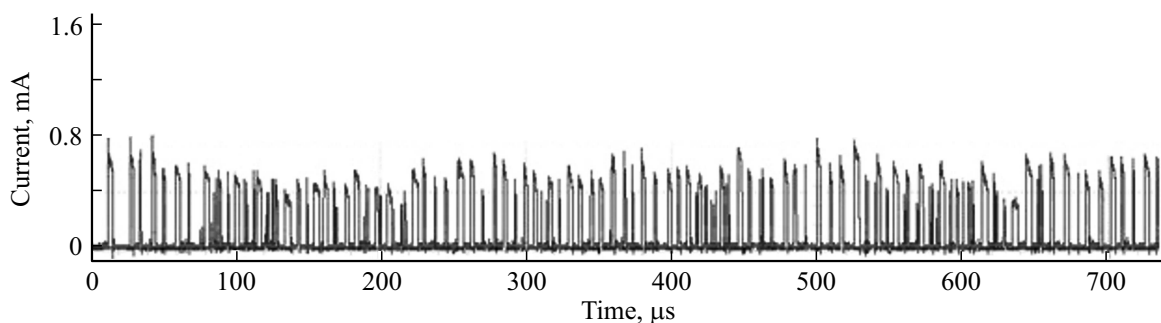
Детектирование колебаний на частотах свыше 1 kHz становится затруднительным в связи с возрастанием шумов. Однако колебания актюатора можно зафиксировать визуально на частотах вплоть до 20 kHz (рис. 7).

При возрастании частоты управляющего напряжения амплитуда отклонения микроактюатора заметно уменьшается. Оценив амплитуду колебаний  $\lambda$  по визуально наблюдаемой в СЭМ вибрации актюатора, можно вычислить значения относительной деформации сплава с ЭПФ

$$\varepsilon = \frac{h\lambda}{L^2}, \tag{1}$$

где  $h$  — толщина актюатора, а  $L$  — его длина. Полученные данные для частоты управляющего напряжения от 1 до 8 kHz представлены на рис. 8. Можно заметить, что, несмотря на резкое падение амплитуды колебаний в диапазоне от 1 до 3 kHz, актюатор сохраняет частичную работоспособность на частотах вплоть до 8 kHz.

Далее было проведено исследование работы актюатора в режиме автоколебаний. Для проведения измерений игла второго манипулятора перемещалась на позицию, показанную на рис. 2 штрихованным контуром. СЭМ-изображение взаимного расположения актюатора и иглы манипулятора приведено на рис. 9. При пропускании электрического тока происходит нагрев и срабатывание актюатора. В результате его изгибной деформации происходит разрыв электрической цепи. Затем происходит охлаждение и возвращение актюатора в исходное положение, что приводит к замыканию электрической цепи. Таким образом, происходит выход актюатора на автоколебательный режим. Было продемонстрировано, что в автоколебательном режиме частота срабатывания актюатора может превышать 100 kHz (рис. 10).



**Рис. 10.** Временная зависимость протекания тока через актюатор при приложении постоянного напряжения. Частота импульсов тока, обусловленных автоколебаниями микроактюатора, более 100 kHz.

#### 4. Заключение

В работе получены следующие результаты.

1. Изготовлены образцы микроактюаторов на основе аморфно-кристаллических композитов из сплава  $Ti_2NiCu$  с размерами  $30 \times 2 \times 2 \mu m$  с амплитудой управляемой деформации  $1 \mu m$ . Продемонстрировано минимальное время срабатывания микроактюатора  $700 \mu s$  при активации импульсами электрического тока.

2. Установлено, что максимальная частота срабатывания микроактюатора при периодическом возбуждении импульсами тока составляет  $1 kHz$ , при этом частичное срабатывание микроактюатора наблюдается при частоте  $20 kHz$ .

3. Показано, что в режиме автоколебания частота срабатывания микроактюатора может превышать  $100 kHz$ .

Таким образом, в работе продемонстрировано рекордное по быстродействию микромеханическое устройство на основе сплава с ЭПФ. По мнению авторов, такие устройства могут найти применение в технологии микро- и нанoeлектромеханических систем для создания исполнительных элементов и роботизированных устройств, в lab-on-a-chip технологии, микробиологии, для исследования биологических (ДНК, сенсиллы насекомых и др.) и небиологических (углеродные нанотрубки, графеновые слои, вискеры) микро- и нанообъектов. При этом стоит отметить, что, несмотря на достигнутые сравнительно высокие частоты срабатывания, эти частоты далеки от частот механического резонанса, которые по оценкам авторов согласно модели физического маятника составляют порядка  $10 MHz$ . Таким образом, если удастся достичь резонансных частот, соотносимых со скоростью протекания тепловых процессов, появится возможность изготовления устройства с еще более высоким быстродействием и с высокой относительной деформацией. Для этого, по-видимому, необходимо уменьшить габариты микроактюатора до  $1 \mu m$  и менее.

#### Список литературы

- [1] H. Sehitoglu, I. Karaman, R. Anderson, X. Zhang, K. Gall, H.J. Maier, Y.I. Chumlyakov. *Acta Materialia* **49**, 747 (2001).
- [2] J. Shaw, S. Kyriakides. *J. Mech. Phys. Solids* **43**, 1243 (1995).
- [3] А.Д. Божко, В.Д. Бучельников, А.Н. Васильев, И.Е. Дикштейн, С.М. Селецкий, В.В. Хавайло, В.Г. Шавров. *Письма в ЖЭТФ*, **67**, 212 (1998).
- [4] V. Buchelnikov, I. Dikhshtein, R. Grechishkin, T. Khudoverdyan, V. Koledov, Y. Kuzavko, I. Nazarkin, V. Shavrov, T. Takagi. *JMMM* **272–276**, 3, 2025 (2004).
- [5] N.I. Kourov, A.V. Korolev, V.G. Pushin, V.V. Koledov, V.G. Shavrov, V.V. Khovailo. *Phys. Met. Metallograf.* **99**, 4, 376 (2005).
- [6] V.G. Pushin, N.I. Kourov, A.V. Korolev, V.A. Kazantsev, L.I. Yurchenko, V.V. Koledov, V.G. Shavrov, V.V. Khovailo. *Phys. Metal. Metallograf.* **99**, 401 (2005).
- [7] S. Saadat, J. Salichs, M. Noori. *Smart Mater. Structures* **11**, 218 (2002).

- [8] D. Wever, A. Veldhuizen, J. de Vries, H.J. Busscher, D.R.A. Uges, J.R. van Horn. *Biomaterials* **19**, 761 (1998).
- [9] L. Ponsonnet, D. Treheux, M. Lissac. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* **23**, 147 (2006).
- [10] K. Otsuka, X. Ren. *Prog. Mater. Sci.* **50**, 511–678 (2005).
- [11] J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson. *Mater. Des.* **56**, 1078–1113 (2014).
- [12] *Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications.* / Eds. A.V. Shelyakov, N.M. Matveeva, S.G. Larin. In: F. Trochu, V. Brailovski, A. Galibois. *Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum Quebec City, Canada*, (1999) p. 295–303.
- [13] P.L. Potapov, S.E. Kulkova, A.V. Shelyakov, K. Okutsu, S. Miyazaki, D. Schryvers. *J. Phys. IV France* **112**, 727 (2003).
- [14] P. Lega, V. Koledov, A. Orlov, D. Kuchin, A. Frolov, V. Shavrov, A. Martynova, A. Irzhak, A. Shelyakov, V. Sampath, V.Khovaylo, P. Ari-Gur. *Adv. Eng. Mater.* **19**, 1700154 (2017).
- [15] A.M. Zhikharev, A.V. Irzhak, M.Y. Beresin, P.V. Lega, V.V. Koledov, N.N. Kasyanov, G.S. Martynov. *J. Phys. Conf. Ser.* **741**, 012206 (2016).
- [16] A.V. Irzhak, P.V. Lega, A.M. Zhikharev, V.V. Koledov, A.P. Orlov, D.S. Kuchin, N.Y. Tabachkova, V.A. Dikan, A.V. Shelyakov, M.Y. Beresin, V.G. Pushin, S.V. von Grattowski, V.Y. Pokrovskiy, S.G. Zybtev, V.G. Shavrov. *Doklady Phys.* **62**, 5 (2017).
- [17] S.H. Song, J-Y. Lee, H. Rodrigue, I-S. Choi, Y.J. Kang, S.H. Ahn. *Sci. Rep.* **6**, 21118 (2016).