

11;19

## Эффект запаздывания при импульсном возбуждении актюатора на основе быстрозакаленного сплава $Ti_2NiCu$ с термоупругим мартенситным переходом

© Р.А. Антонов<sup>1</sup>, А.П. Каманцев<sup>1</sup>, В.В. Коледов<sup>1,¶</sup>, Л.В. Коледов<sup>1</sup>, Д.С. Кучин<sup>1</sup>, П.В. Лега<sup>1</sup>,  
Е.В. Морозов<sup>1</sup>, А.П. Орлов<sup>1</sup>, А.П. Сиваченко<sup>3</sup>, В.Г. Шавров<sup>1</sup>, А.В. Шеляков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

<sup>3</sup> Донецкий физико-технический институт им. Галкина, Донецк, Украина

¶ E-mail: victor\_koledov@mail.ru

Экспериментально изучен импульсный отклик актюатора на основе быстрозакаленного сплава  $Ti_2NiCu$  с термоупругим мартенситным переходом и эффектом памяти формы. Показано, что механический отклик актюатора, охлаждаемого проточной водой, сохраняется при уменьшении длительности возбуждающих (активирующих) электрических импульсов до 2 ms. Высокоскоростная активация сопровождается задержкой механического импульса по сравнению с возбуждающим электрическим импульсом. Минимальная длительность механического импульса с учетом задержки составила 8 ms, что соответствует частоте колебаний 125 Hz при периодической активации. Оценки показывают, что время задержки включает как время механической инерции, так и время тепловой инерции, связанное с теплопередачей. Сделана оценка для возможного ограничения скорости активации за счет кинетических явлений при термоупругом мартенситном переходе.

Работа профинансирована Российским научным фондом, грант № 17-19-01748.

DOI: 10.21883/FTT.2018.06.45997.21M

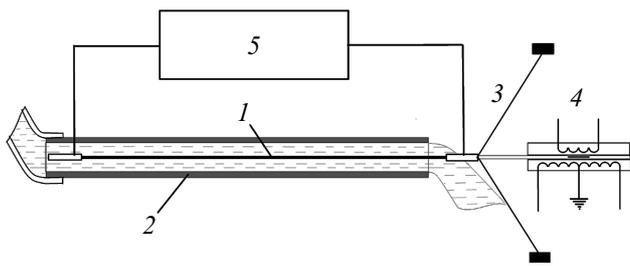
### 1. Введение

С момента открытия термоупругого мартенситного превращения в интерметаллических сплавах и связанного с ним эффекта памяти формы (ЭПФ) не прекращаются попытки использовать исполнительные элементы на их основе для создания различных механических систем, в частности моторов и актюаторов [1–6]. Привлекательной особенностью таких сплавов являются значительные термоуправляемые деформации. В частности, в сплаве  $TiNi$  под действием механического напряжения порядка 100 МПа могут накапливаться деформации до 8% при охлаждении в результате перехода из аустенитной высокотемпературной фазы в низкотемпературную мартенситную фазу и полностью исчезать при нагреве. Сплавы с ЭПФ в качестве рабочего тела двигателя, по сравнению с другими типами функциональных материалов, имеют такие преимущества, как высокое развиваемое усилие и высокая удельная мощность, небольшой нагрев, необходимый для активации. К их недостаткам часто относят низкое быстродействие, которое, в основном, объясняют необходимостью выждать период времени, необходимый для охлаждения исполнительного элемента с ЭПФ. Для преодоления этого недостатка применялись такие приемы, как принудительная конвекция охлаждающего воздуха [7], использование теплоотвода [8], охлаждение с использованием водяного канала [9] и теплового насоса [10]. Один из наилучших результатов,

который удалось получить на сегодняшний день, — быстродействие 35 Hz изгибного актюатора на основе композита из тонких проволок  $Ti-Ni$  в полимерной матрице [11]. Кроме прикладного интереса, экспериментальное изучение быстродействующих актюаторов с ЭПФ должно пролить свет на физические закономерности кинетики протекания термоупругого мартенситного фазового перехода первого рода и взаимосвязь тепловых и механических процессов при переходе.

### 2. Образцы и методы

В качестве объекта для исследования была выбрана быстрозакаленная лента сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ. Исследования структурных и термомеханических свойств выбранного сплава проводились многими исследователями [12–20]. Исходные ленты, полученные при скоростях охлаждения расплава около  $10^6$  K/s, имеют аморфную структуру. Для получения кристаллической фазы и ЭПФ проводят термообработку аморфной ленты. В кристаллическом состоянии сплав демонстрирует термоупругое мартенситное превращение первого рода из аустенитной фазы с кубической решеткой B2 в мартенситную фазу B19 с моноклинной решеткой. Температуры начала и конца прямого и обратного мартенситных переходов составляют:  $M_s = 60^\circ C$ ,  $M_f = 52^\circ C$ ,  $A_s = 55^\circ C$ ,  $A_f = 64^\circ C$  соответственно [12]. Термообработка может проводиться



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования активации быстрозакаленной ленты сплава  $Ti_2NiCu$  с термоупругим мартенситным переходом импульсами электрического тока. 1 — образец быстрозакаленной ленты сплава  $Ti_2NiCu$ ; 2 — трубка с проточной водой; 3 — струна; 4 — датчик перемещения; 5 — генератор импульсов тока.

нагревом в печи или пропусканием электрического тока. Второй способ имеет преимущества, заключающиеся в том, что он позволяет точнее контролировать долю кристаллической фазы, требует меньше энергозатрат и не требует громоздкого оборудования [21]. Именно отжиг электрическим током и был выбран в качестве термообработки лент для описанных ниже экспериментов. При пропускании тока фазовый состав лент контролировался по электросопротивлению, как это описано в [22]. После отжига небольшая часть (около 1 см) ленты помещалась в специальную установку по измерению величины обратимой деформации в зависимости от температуры образца при различных механических напряжениях. Типичный пример такой зависимости описан в работе [23]. Для этой зависимости характерны резкое уменьшение деформации при нагреве и увеличение при охлаждении при переходе через точки фазового перехода, сопровождающееся гистерезисом. Разницу величин деформации в мартенситном и аустенитном состояниях называют обратимой деформацией. Обратимая деформация имеет немонокотную зависимость от приложенного механического напряжения: при увеличении напряжения сначала происходит рост величины обратимой деформации, после чего ее значение снижается.

В настоящей работе в ходе эксперимента обратный мартенситный переход в быстрозакаленной кристаллической ленте сплава  $Ti_2NiCu$  из мартенситной фазы в аустенитную достигался нагревом импульсами электрического тока, а прямой мартенситный переход реализовывался охлаждением образца ленты потоком холодной воды. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Образец (1) представлял собой отрезок быстрозакаленной ленты сплава  $Ti_2NiCu$  длиной  $L = 30$  см, шириной  $b = 2$  мм, толщиной  $h = 40$  мкм. Он закреплен одним концом в трубке с проточной водой (2), а другой его конец прикреплен вне потока воды к струне (3), создающей силу натяжения. Струна применяется в качестве упругого элемента для того, чтобы уменьшить механическую инерцию всей системы. Также к этому концу образца жестко прикреплен индукционный дат-

чик (4) линейного перемещения LDVT S5-200AG, представляющий собой трансформаторный преобразователь, на который подается переменный сигнал несущей частоты 5000 Hz. Амплитуда сигнала на выходе трансформатора пропорциональна перемещению штока, жестко соединенного с актюатором (лентой), подпружиненной натянутой струной. Диапазон измеряемых перемещений составляет 0–5 мм. Сигнал от датчика передается на АЦП (E14-440), а затем на компьютер. К концам ленты припаяны контактные лепестки, которые подключены к генератору импульсов тока (5). На основе данных, поступающих с АЦП на компьютер, строятся графики скорости деформации образца и отмечается начало и конец импульса возбуждающего тока.

### 3. Экспериментальные результаты

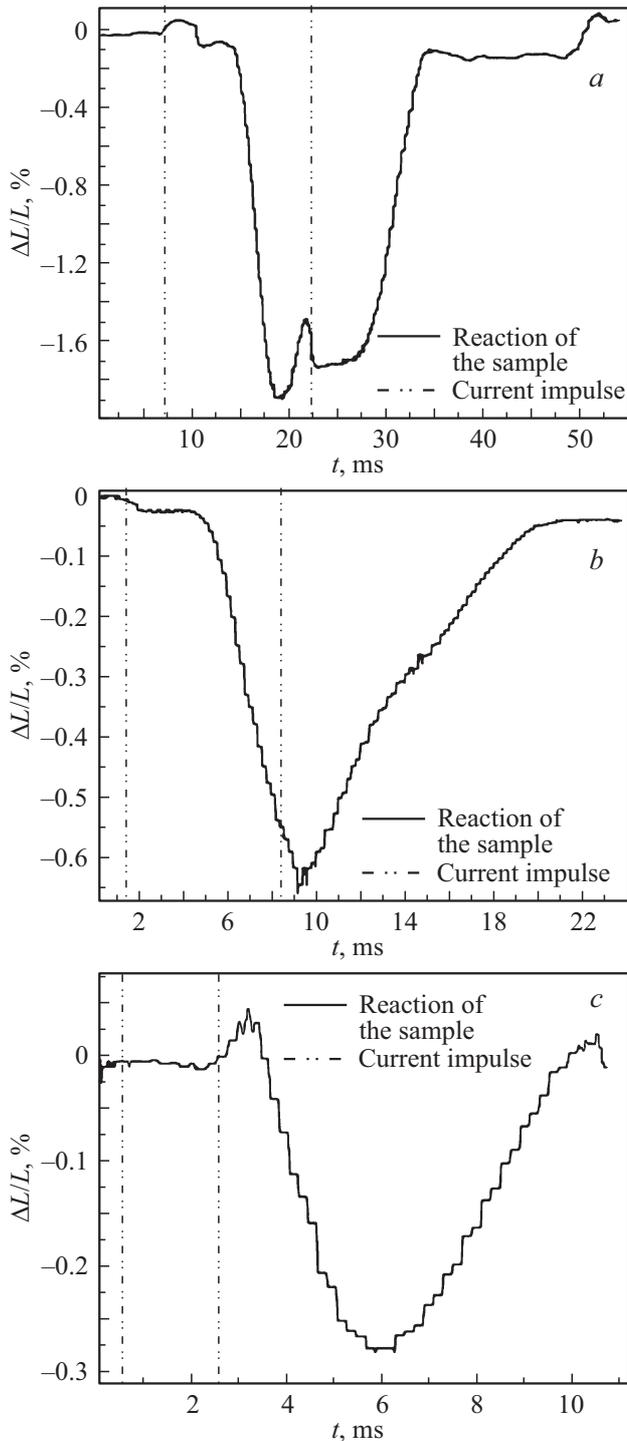
Изначально образец (1) находится в потоке протекающей холодной воды в мартенситном состоянии при температуре  $T = 18^\circ C$  ниже  $M_f$ . На него действует растягивающее усилие до 10 N от натянутой струны (3). При этом создаваемое в образце механическое напряжение находится в диапазоне от 0 до 125 МПа. В ходе эксперимента на образец подается импульс тока прямоугольной формы от генератора (6) с амплитудой от 1 до 40 А и длительностью от 1 до 10 ms. В результате образец нагревается джоулевым теплом протекающего тока до температуры  $A_f$ . Это вызывает обратный мартенситный переход сплава из мартенситной фазы в аустенитную и приводит к сокращению длины ленты на 1–3%. После окончания импульса тока проточная вода быстро охлаждает образец ниже температуры  $M_f$ , и лента возвращается к первоначальному размеру.

На рис. 2, а–с показаны зависимости относительной деформации ленты от времени при разных длительности и амплитуде импульсов тока. На графиках штриховыми вертикальными прямыми показаны моменты начала и окончания импульса тока.

На рис. 2, а показан механический отклик образца сплава на импульс тока амплитудой 17 А и длительностью 15 ms. На графике наблюдаются четыре характерные зоны: начальная задержка — 6.0 ms, передний фронт — 4.0 ms, плато — 6.6 ms, задний фронт — 10.0 ms. Изменение длины образца  $\Delta L$  составляет около 3 мм, что соответствует относительной деформации ленты  $\Delta L/L \sim 1\%$ . При сокращении длительности импульса тока до 7 ms (см. рис. 2, б) плато практически исчезает, а задержка равна 3.0 ms, длина переднего фронта — 3.0 ms, длина заднего фронта — 8.0 ms, максимальная деформация образца — 0.9%.

Минимальный по длительности импульс, при котором удалось зарегистрировать реакцию образца (см. рис. 2, в), имеет амплитуду 38 А и длительность 2 ms. На отклике наблюдаются следующие характерные зоны: задержка 2.3 ms, длина переднего фронта реакции 2.0 ms, длина заднего фронта 3.5 ms. При этом относительная

деформация образца составляет 0.3%, а полная длительность отклика с учетом задержки около 8.0 ms. Это соответствует частоте колебаний при периодическом возбуждении 125 Hz. Результат превышает рекордное на сегодняшний день значение рабочей частоты для актюаторов с ЭПФ [11].



**Рис. 2.** Зависимость деформации ленты от времени при активации одиночным импульсом электрического тока с разной длительностью и амплитудой: (a) 15 ms, 17 A; (b) 7 ms, 17 A; (c) 2 ms, 38 A.

#### 4. Обсуждение результатов

Для того, чтобы сделать по полученным экспериментальным данным приближенные оценки характерных времен, связанных с термомеханическими процессами при мартенситном переходе, оценим, прежде всего, резонансную частоту  $\omega$  механической системы, включающей образец в виде ленты, шток датчика перемещений и струну. Измерения показывают, что суммарная жесткость механической системы  $\beta \sim 10^4$  N/m, масса ленты мала:  $m_R = \rho Lhb \approx 0.15$  г, где  $\rho = 6500$  kg/m<sup>3</sup> — плотность сплава. Наиболее массивная подвижная часть механической системы — шток датчика перемещений — имеет массу порядка  $m_s \approx 1$  г. Таким образом,  $\omega = (\beta/m)^{1/2} \approx 3 \cdot 10^3$  s<sup>-1</sup>. Период механических колебаний в резонансе  $t_m = 2\pi/\omega \approx 2 \cdot 10^{-3}$  s. Следовательно, механическая система „образец–струна–датчик“ имеет резонансную частоту в диапазоне 10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> Hz. Это может ограничить время наблюдаемой во всех экспериментах зоны начальной задержки отклика величиной порядка миллисекунд. Начальная задержка также включает время, необходимое для нагрева ленты до значений выше температуры  $A_s$ . Без учета потерь, время  $t_c$ , необходимое для разогрева образца ленты электрическим током выше температуры  $A_f$ , можно оценить, воспользовавшись соотношением  $t_c \sim c\rho Lhb\Delta T/I^2R$ , где  $R = 6.5 \Omega$  — электрическое сопротивление образца,  $I \approx 100$  A — амплитуда тока,  $\Delta T = A_f - T_0$ ,  $T_0$  — температура воды,  $c$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — плотность. Такая оценка дает значение  $t_c \sim 1$  ms, которое совпадает по порядку величины со временами механической инерции.

Следует также оценить возможный вклад в формирование механического отклика системы характерных времен, связанных с процессом протекания мартенситного фазового перехода. Как показывают полученные экспериментальные данные, сплаву с ЭПФ свойственна задержка механического отклика по отношению к импульсу тока. Наиболее ярко это поведение проявляется при самых коротких импульсах тока. В случае длительности возбуждающего импульса тока менее 2 ms, механический импульс начинается уже после окончания электропоточного, а его завершение наблюдается через 8 ms, включая 2 ms начальной задержки (см. рис. 2, c).

Сделаем оценки характерных времен, необходимых для релаксации теплового импульса, вызванного электрическим током. Если пренебречь тепловым сопротивлением на границах ленты образца с проточной водой, то без учета фазового перехода характерное время составит:  $t_1 \sim h^2/4a^2$ , где  $h$  — толщина образца,  $a^2 = k/c\rho$  — коэффициент температуропроводности сплава,  $k$  — коэффициент теплопроводности. Оценка для сплава Ti<sub>2</sub>NiCu при  $k = 10$  W/m · K,  $c = 836.8$  J/kg · K, дает  $t_1 \approx 0.04$  ms.

Наличие фазового перехода замедляет движение теплового фронта. Учет влияния фазового перехода проводился с использованием решения задачи Стефана [24].

Для оценки скорости движения теплового фронта с учетом движения границы фазового перехода первого рода мартенсит–аустенит, согласно [24], вводится эффективная температуропроводность  $\alpha$ , которая определяется соотношением  $x = \alpha t^{1/2}$ , где  $x(t)$  — координата движущейся при охлаждении образца границы фазового перехода,  $t$  — время. Коэффициент  $\alpha$  вычисляется с помощью известных характерных констант материала, включая скрытую теплоту фазового перехода  $\lambda = 10 \text{ kJ/kg}$  и разность температур  $\Delta T = M_f - T_0$ . Методом, описанным в [24], находим, что для  $\alpha \sim 10^{-3} \text{ m/s}^{1/2}$ . Так как образец ленты охлаждается симметрично с двух сторон, получаем для времени движения фронта фазового перехода на расстояние  $h/2$   $t_2 = x^2/\alpha^2 \sim 10^{-4} \text{ s}$ .

Таким образом, теплопроводность сплава, даже с учетом фазового перехода, не объясняет наблюдаемые характерные времена задержки импульса порядка 6–8 ms. Только два неучтенных фактора — теплоотдача в проточную воду и характерные времена внутренних процессов, сопровождающих мартенситный фазовый переход, — могут дать объяснение столь значительному (на 1–2 порядка) расхождению. Действительно, оценки для характерного времени теплоотдачи из металлического образца в проточную воду могут дать более близкие к экспериментальным значения времени релаксации. Пусть  $\gamma$  — коэффициент теплоотдачи ленты в проточную воду. При скорости течения воды  $\sim \text{m/s}$  оценки, согласно [25], дают  $\gamma \sim 2 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Для времени тепловой релаксации  $t_3$  без учета фазового перехода получаем  $t_3 = cph/2\gamma \sim 5 \text{ ms}$ . По порядку величины полученные значения согласуются с экспериментом.

Таким образом, остается неучтенным единственный фактор — характерные времена, связанные с термоупругим мартенситным переходом, в частности, времена, необходимые для появления в аустените зародышей мартенситной фазы при резком понижении температуры и их роста. Если вклад этих процессов и существенен, то он менее или сопоставим по порядку величины с найденным выше значением  $t_3 \sim 5 \text{ ms}$ . Это отвечает скорости движения границы аустенит–мартенсит не менее  $v = 10^{-2} \text{ m/s}$ . В настоящее время в литературе отсутствуют результаты прямых измерений характерных скоростей мартенситного перехода при термоупругом мартенситном переходе в интерметаллидах. В то же время в [26] сообщается о возможности движения границы мартенситного (нетермоупругого) перехода в стали со скоростью порядка скорости звука ( $v \sim 10^3 \text{ m/s}$ ). Таким образом, полученная в настоящей работе экспериментальная оценка позволяет считать, что предельная скорость движения границы аустенит–мартенсит при прямом термоупругом переходе в сплаве  $\text{Ti}_2\text{NiCu}$  более  $10^{-2} \text{ m/s}$ .

Следует отметить, что достигнутые в данных исследованиях значения скорости активации 8 ms по длительности импульса и 125 Hz по периодическому отклику превосходят известные на сегодняшний день достижения

других авторов по быстрдействию для актюаторов с ЭПФ [11]. Удельная мощность актюатора на основе быстрозакаленной ленты сплава  $\text{Ti}_2\text{NiCu}$  с термоупругим мартенситным переходом, оцениваемая по формуле  $P = F\Delta Lf/m_R$  ( $F = 10 \text{ N}$  — развиваемое усилие,  $f$  — частота,  $m_R$  — масса), довольно велика ( $P \sim 30 \text{ kW/kg}$ ). Можно предположить, что рассмотренный в настоящей работе принцип скоростной активации быстрозакаленных сплавов с термоупругим мартенситным переходом и ЭПФ в виде лент, несмотря на необходимость охлаждения проточной водой, окажется полезным, например, в гидроакустике для генерации мощных акустических импульсов.

## 5. Заключение

В заключение сформулируем основные результаты настоящей работы.

1) Исследование охлаждаемого проточной водой актюатора на основе быстрозакаленного сплава  $\text{Ti}_2\text{NiCu}$  с термоупругим мартенситным переходом показало, что механический отклик актюатора сохраняется при уменьшении длительности возбуждающих (активирующих) электрических импульсов до 2 ms. Высокоскоростная активация сопровождается задержкой механического импульса по сравнению с возбуждающим электрическим импульсом. Минимальная длительность механического отклика с учетом задержки составила 8 ms, что соответствует частоте колебаний 125 Hz при периодической активации.

2) Проведенные оценки характерных времен тепловых процессов при активации, в том числе влияния фазового перехода на скорость распространения теплового фронта на основе решения задачи Стефана, показали, что задержка механического отклика определяется главным образом интенсивностью теплоотдачи в проточную воду.

3) Получена экспериментальная оценка для предельной скорости движения границы аустенит–мартенсит при прямом термоупругом мартенситном переходе первого рода в сплаве  $\text{Ti}_2\text{NiCu}$ , которая превышает величину  $10^{-2} \text{ m/s}$ .

## Список литературы

- [1] Г.В. Курдюмов. ДАН **60**, 1543 (1948).
- [2] Г.В. Курдюмов. ЖТФ **18**, 999 (1948).
- [3] Г.В. Курдюмов, Л.Г. Хандрос. ДАН **66**, 211 (1949).
- [4] Б.А. Билби, И.В. Христиан. УФН **LXX**, 3, 515 (1960).
- [5] В.А. Лихачев. Соросовский образоват. журн. **3**, 107 (1997).
- [6] Материалы с эффектом памяти формы. Справ. изд. в 4 т. / Под ред. В.А. Лихачева. СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ (1997–1998).
- [7] G. Webb, L. Wilson, D. Lagoudas, O. Rediniotis. AIAA J. **38**, 325 (2000).
- [8] C.S. Loh, H. Yokoi, T. Arai. Int. J. Adv. Robot. Syst. **3**, 42 (2006).

- [9] O.K. Rediniotis, D.C. Lagoudas. *Progr. Astronautics Aeronautics* **195**, 483 (2001).
- [10] A.R. Shahin, P.H. Meckl, J.D. Jones, M.A. Thrasher. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **5**, 95 (1994).
- [11] S.-H. Song, J.-Y. Lee, H. Rodrigue, I.-S. Choi, Y.J. Kang, S.-H. Ahn. *Sci. Rep.* **6**, 21118 (2016).
- [12] A.V. Shelyakov, N.M. Matveeva, S.G. Larin. In: *Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications.* / Eds F. Trochu, V. Brailovski, Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum (1999). P. 295–303.
- [13] A.M. Glezer, E.N. Blinova, V.A. Pozdnyakov, A.V. Shelyakov. *J. Nanoparticle Res.* **5**, 551 (2003).
- [14] P.L. Potapov, S.E. Kulkova, A.V. Shelyakov, K. Okutsu, S. Miyazaki, D. Schryvers. *J. Phys. IV France* **112**, 727 (2003).
- [15] A.V. Shelyakov, N.N. Sitnikov, A.P. Menushenkov, V.V. Koledov, A.I. Irjak. *Thin Solid Films* **519**, 5314 (2011).
- [16] P. Ari-Gur, A.S.B. Madiligama, S.G. Watzka, A. Shelyakov, D. Kuchin, V. Koledov, W. Gao. *J. Alloys Comp.* **586**, S469 (2014).
- [17] С.П. Беляев, В.В. Истомин-Кастровский, В.В. Коледов, Д.С. Кучин, Н.Н. Реснина, Н.Ю. Табачкова, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков, С.Е. Иванов. *Изв. РАН. Сер. физ.* **75**, 1138 (2011).
- [18] Р.М. Гречишкин, С.В. Ильяшенко, В.В. Истомин, В.С. Калашников, В.В. Коледов, Д.С. Кучин, П.В. Лега, В.В. Лучинин, Е.П. Перов, А.Ю. Савенко, В.Г. Шавров, А.В. Шеляков. *Изв. РАН. Сер. физ.* **73**, 1138 (2009).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] D.S. Kuchin, P.V. Lega, A.P. Orlov, V.V. Koledov, A.V. Irzhak. *Int. Conf. on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales. MARSS 2017–Proceedings.* 8001932 (2017).
- [22] S.P. Belyaev, V.V. Istomin-Kastrovskiy, V.V. Koledov, D.S. Kuchin, N.N. Resnina, V.G. Shavrov, A.V. Shelyakov, S.E. Ivanov. *Phys. Procedia* **10** 39 (2010).
- [23] S.P. Belyaev, N.N. Resnina, A.V. Irzhak, V.V. Istomin-Kastrovsky, V.V. Koledov, D.S. Kuchin, V.G. Shavrov, P. Ari-Gur, A.V. Shelyakov, N.Yu. Tabachkova. *J. All. Comp.* **586**, S222 (2014).
- [24] А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. *Уравнения математической физики: Учебн. пособ.* М.: Изд-во МГУ (1999). 798 с.
- [25] С.С. Кутателадзе. *Основы теории теплообмена.* Атомиздат. М. (1979). 416 с.
- [26] М.П. Кашенко, В.Г. Чащина. *УФН* **181**, 345 (2011).