

УДК 669.018.234

ВАРИАЦИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ  
НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ ЦИКЛИРОВАНИИ  
В ИНТЕРВАЛЕ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

В. Я. Ерофеев\*, член-корреспондент РАН М. В. Кабанов

Поступило 23.07.2018 г.

Приведены результаты анализа многолетних вариаций скорости деформации TiNi-элемента при циклировании в интервале мартенситного превращения. Показано, что факторы, участвующие в формировании состояния окружающей среды, могут вызывать неустойчивость в работе функциональных технических элементов, подобных функциональным элементам на основе никелида титана.

**Ключевые слова:** датчики, мониторинг окружающей среды, аварийные ситуации, металл с эффектом памяти формы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846682-685>

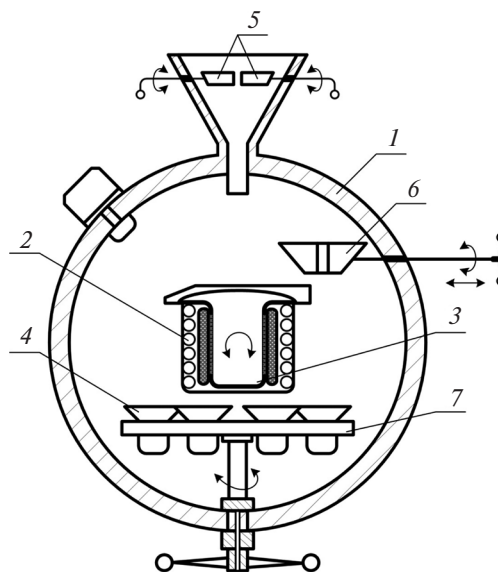
В настоящее время активное внедрение функциональных элементов на базе никелида титана в устройствах различного назначения [1–4], в том числе в качестве датчиков для контроля ряда параметров атмосферы [5], определяет актуальность исследований эксплуатационной надёжности этих элементов в зависимости от внешних условий.

Для таких исследований был использован элемент, изготовленный из сплава TiNi эквиатомного состава, подвергнутый предварительному циклированию (около 1000 циклов) в интервале мартенситного превращения при постоянной нагрузке 50 МПа.

Исследуемый сплав был получен по технологии, разработанной в ИМКЭС СО РАН, с применением специального металлургического вакуумного оборудования (рис. 1). Использован метод индукционного нагрева металла в защитной атмосфере. Автоматическое перемешивание расплава обеспечивало высокую однородность состава и точность в соотношении между долями атомов титана и никеля. Испытуемые образцы из полученных слитков производили стандартными кузнечно-прессовыми операциями. Финишная термообработка заключалась в отжиге в вакуумной печи при 800 °С в течение 1 ч, после чего образец имел температуру начала перехода в низкотемпературную мартенситную фазу, равную  $20 \pm 2$  °С.

Долговременное термоциклирование под постоянной нагрузкой 50 МПа проводили в автоколеба-

тельном режиме по схеме, описанной в [6]. Эксперимент проводился в термовлагодостойчивых условиях: суточное отклонение температуры в рабочей камере не превышало 0,5 °С, влажность оставалась постоянной. Измеряемым параметром являлась скорость деформации образца, определяемая по вспышкам лампы накаливания, которая в автоколебательном режиме включалась и выключалась, обеспечивая изменение температуры образца отно-



**Рис. 1.** Схема камеры плавильной установки: 1 — водоохлаждаемая плавильная камера, 2 — водоохлаждаемый индуктор, 3 — плавильный тигель поворотного типа, 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор, 5 — дозаторные ковши, 6 — транспортный ковш, 7 — водоохлаждаемый шестипозиционный карусельный барабан.

Институт мониторинга климатических  
и экологических систем Сибирского отделения  
Российской Академии наук, Томск

\*E-mail: [erofeev\\_vy@sibmail.com](mailto:erofeev_vy@sibmail.com)

сительно точки мартенситного превращения. Наблюдаемая при этом амплитуда изменения формы образца была фиксированной, что обеспечивалось установленными концевыми бесконтактными датчиками. Таким образом, зная пройденный путь и время, за которое происходит изменение и восстановление формы, получали искомый параметр — скорость деформации образца. Скорость измеряли в режиме мониторинга с 10-минутным шагом. Ошибка в измерении составляла 0,2%. Измеренная величина в непрерывном режиме фиксировалась блоком управления и передавалась на ЭВМ с последующим построением графиков временной зависимости скорости деформации. Графики построены с учётом того, что фоновое значение скорости деформации условно принято за единицу. Их типичный вид и поведение переменной в отдельных случаях представлены на рис. 2. Иррегулярное поведение переменной (рис. 2а) перемежается с квазипериодической зависимостью (рис. 2б). Присутствуют отдельные виды зависимостей, такие как пикообразная (а, 14 ноября 2013 г.), П-образная (б, 4 июля 2016 г.), медленный подъём до максимума и быстрый спад (в); быстрый подъём и медленный спад (г).

Анализ временной зависимости скорости деформации показал, что на протяжении всего периода наблюдений её среднегодовая вариация колеблется в пределах 3–5%. В то же время в течение года возникают от 4 до 6 случаев, когда отклонение от фона составляет свыше 10%. При этом воспроизводимость наблюдаемой свыше семи лет картины в целом от года к году близка к 100%. Таким образом, деформационные параметры никелида титана в условиях циклирования в интервале фазовых переходов под постоянной нагрузкой испытывают обратимую временную зависимость, в том числе скачкообразную.

Применяемые в технике и медицине функциональные элементы из никелида титана имеют три основных эксплуатационных параметра: величину восстанавливаемой деформации, развиваемые усилия и количество рабочих циклов до разрушения. Описанные вариации параметров деформации напрямую могут оказывать влияние на вторую из указанных характеристик и косвенно — на две другие. Такое воздействие может вывести рабочие характеристики TiNi-датчика за рамки штатного режима с вытекающими последствиями. При этом обратимый характер изменения рабочих характеристик

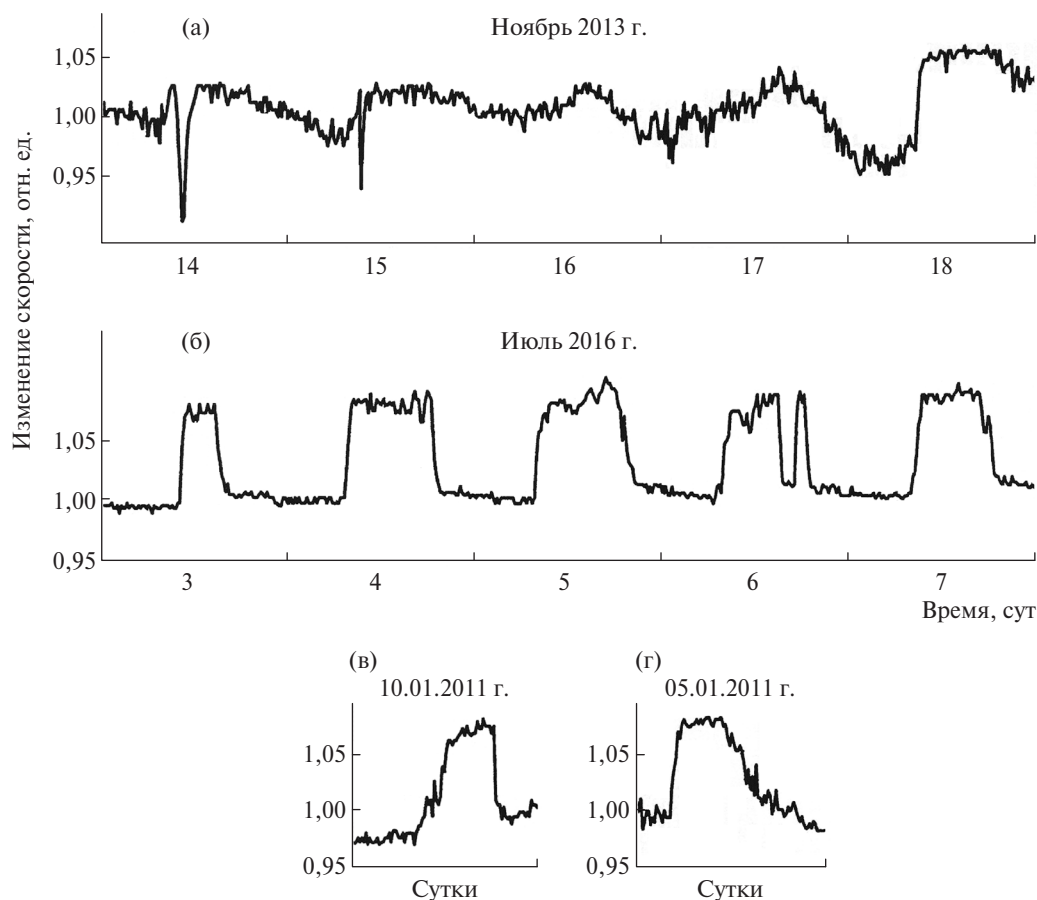


Рис. 2. Временная зависимость скорости деформации TiNi-элемента.

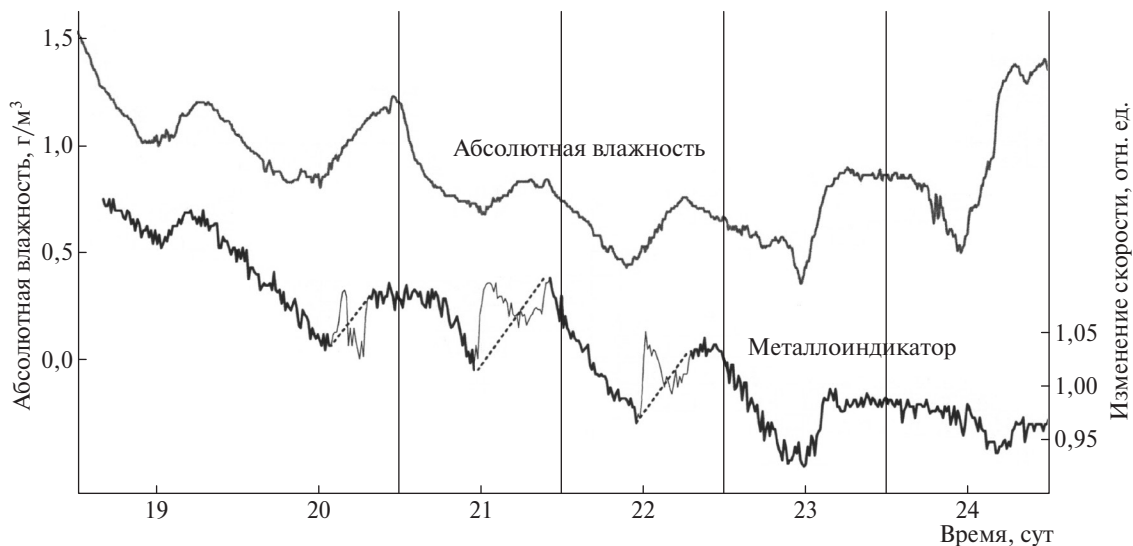
может ввести аварийную комиссию в заблуждение: в момент анализа нештатной ситуации датчик может показать штатные параметры из-за указанной выше обратимости. Описанные случаи с TiNi-датчиками в отношении нештатных ситуаций могут быть распространены на любые другие типы датчиков, многокомпонентное или многослойное вещество которых в своих диаграммах состояний имеет участки с точками фазовых превращений вблизи термодинамических условий эксплуатации. В этом случае воздействие внешних полей может обратимо выводить параметры таких датчиков из штатного режима.

Предварительные сведения о факторе, вызывающем представленные закономерности, могут быть получены с помощью метода сравнения одновременных ходов кривых показаний TiNi-элемента и значений какого-либо параметра, характеризующего состояние окружающей среды [7]. При этом следует учесть, что маловероятно, чтобы предполагаемый фактор имел исключительно термодинамическую основу. Это следует из того, что TiNi-элемент в ходе испытаний находится в практически неизменных термодинамических условиях. Поэтому при отборе из доступных параметров среды для сравнения была выбрана абсолютная влажность приземной атмосферы. Известно, что малоамплитудные вариации влажности связаны с вариациями концентрации капельных квазикристаллических кластеров, образованных за счёт электрического межкапельного взаимодействия [8]. Данные по влажности были получены из показаний прибора АМК-3 [9], установленного на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН на расстоянии в несколько десятков метров от места расположения TiNi-элемента.

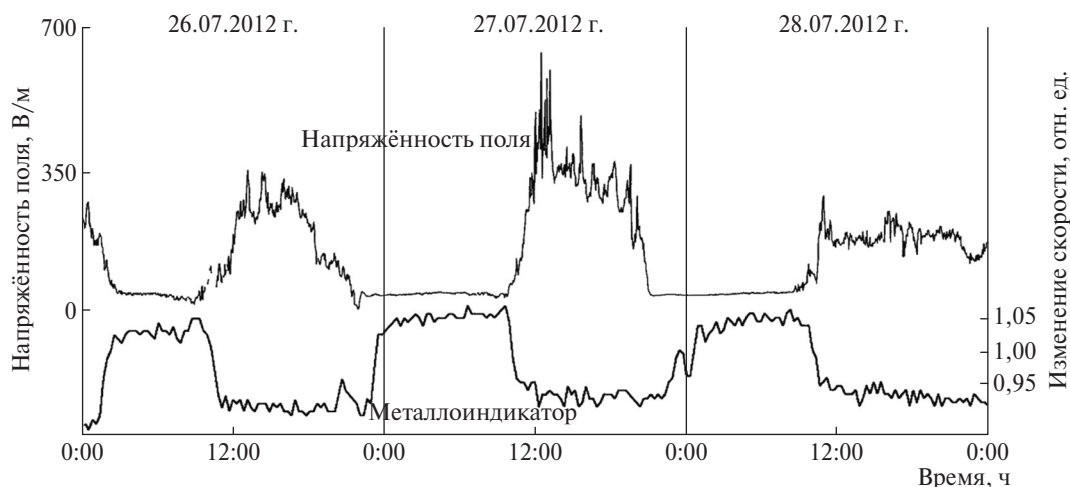
На рис. 3 показан ход кривых, полученных за один и тот же период времени. Совпадение графиков близко к 100% с учётом того, что в отличие от случая сравнения хода кривых показаний состояния TiNi-элемента с кривыми значений атмосферного давления [7] участки совпадения по абсолютному значению перемежаются с участками, где совпадение идёт по осреднённым показаниям TiNi-элемента (участки, обозначенные пунктирными линиями). Такая особенность, по-видимому, связана с механизмом формирования влаги в атмосфере, в том числе с инерционностью этого процесса.

Поскольку в процессе формирования абсолютной влажности участвует электрическая составляющая, то целесообразно было обратиться дополнительно к рассмотрению хода кривых TiNi-элемента и хода кривой того параметра атмосферы, который имеет прямое отношение к электричеству, а именно к напряжённости электрического поля приземной атмосферы. Данные электрического поля были взяты из показаний датчика “Поле-2” [10], также расположенного в нескольких десятках метров от TiNi-элемента. На рис. 4 представлен ход кривых TiNi-элемента и электрического поля. Здесь также наблюдается совпадение (в данном случае зеркальное) графиков, близкое к 100%.

Синхронный ход зависимостей свидетельствует о том, что в попарных системах металл — влажная среда и металл — электрическое поле происходят, в силу определённых причин одновременные процессы в каждой из участвующих субстанций. В обоих случаях присутствует модуляция электрического потенциала, которая непосредственно участвует



**Рис. 3.** Сравнение временной зависимости скорости деформации TiNi-элемента и абсолютной влажности в приземной атмосфере (по данным 19–24 февраля 2011 г.).



**Рис. 4.** Сравнение временной зависимости скорости деформации TiNi-элемента и напряжённости электрического поля в приземной атмосфере.

в формировании вариаций влажности и напряжённости электрического поля. Однако непосредственное влияние наблюдаемых вариаций атмосферного электрического поля (сотни вольт на метр) представляется невозможным для мартенситных превращений в парамагнитном TiNi-элементе. Поэтому можно говорить о наличии общей внешней синхронизации колебаний параметров в рассматриваемых случаях. Тем более что в процессах формирования атмосферного электричества могут играть роль различные внешние факторы, в том числе внеземного происхождения [11].

Представленные данные свидетельствуют о том, что внешние факторы, формирующие состояние окружающей среды, могут оказывать влияние на работу контролируемых, регулирующих и других функциональных элементов, что необходимо учитывать при разработке и эксплуатации технических средств, связанных с повышенными рисками, а также при анализе аварийных ситуаций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Humbeeck J. // Mater. Sci. Eng. A. 1999. V. 273–275. P. 134.
2. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Applications. Monreal: ETS Publ., 2003. P. 851.
3. Shelyakov A.V., Larin S.G., Ivanov V.P., Sokolovski V.V. // J. Phys. IV. 2003. V. 112. P. 1169–1172.
4. Yongqing F., Hejun D., Weimin H., et al. // Sensors. A. 2004. V. 112. P. 395.
5. Выборнов П.В., Ерофеев В.Я., Кабанов М.В. Способ измерения атмосферного давления. Пат. РФ 2572789 // Бюл. 2014. № 2. 5 с.
6. Кабанов М.В., Ерофеев В.В., Ерофеев В.Я. Устройство для учебной демонстрации физико-химических явлений. Пат. РФ 2374698 // Бюл. 2009. № 33. 8 с.
7. Ерофеев В.Я., Кабанов М.В., Выборнов П.В., Комаров А.И. // ДАН. 2015. Т. 465. № 6. С. 727–731.
8. Шавлов А.В., Соколов И.В., Хазанов В.Л., Джуманджи В.А. // ДАН. 2015. Т. 461. № 6. С. 704–709.
9. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Ильичевский В.С. и др. // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.
10. Датчик напряженности электрического поля “Поле-2”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л.: Главная геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова, 1991. 35 с.
11. Gurevich A.V., Karashtin A.N. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. 185005.

## VARIATIONS IN THE STRAIN PARAMETERS OF TITANIUM NICKELIDE DURING MARTENSITIC TRANSFORMATION CYCLING

V. Ya. Erofeev, Corresponding Member of the RAS M. V. Kabanov

Received July 23, 2018

The results of analyzing the long-term variations in the strain rate of a TiNi element during martensitic transformation cycling have been reported. It is shown that the factors involved in the formation of the state of the environment lead to unstable operation of functional technical elements similar to those based on titanium nickelide.

**Keywords:** sensors, environmental monitoring, emergencies, shape memory effect metal.